

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

17. listopadu 15, 708 33 Ostrava – Poruba

Hornicko-geologická fakulta

Institut geoinformatiky

**VLIV ÚROVNĚ ROZLIŠENÍ VSTUPNÍCH GEODAT
NA VÝSLEDKY HYDROLOGICKÉHO MODELOVÁNÍ
V POVODÍ LUBINY**

Disertační práce

Autor:

Školitel:

Studijní program:

Obor:

Mgr. Martin Adamec

Doc. RNDr. Jaromír Kaňok, CSc.

3646 Geodézie a kartografie

2104-9 Geoinformatika

Ostrava 2010

VŠB – Technical university of Ostrava

17. listopadu 15, 708 33 Ostrava – Poruba

Faculty of Mining and Geology

Institute of geoinformatics

**THE INFLUENCE OF GEODATA SPATIAL RESOLUTION
ON HYDROLOGIC MODELING IN THE LUBINA RIVER
BASIN**

Dissertation thesis

Author:

Supervisor:

Study program:

Field of study:

Mgr. Martin Adamec

Doc. RNDr. Jaromír Kaňok, CSc.

3646 Geodesy and cartography

2104-9 Geoinformatics

Ostrava 2010

Abstrakt

Práce zkoumá formou případové studie použití geodat s různou úrovní rozlišení pro stavbu semidistribuovaného srážkoodtokového modelu. Jako vstupní geodata byly použity dvě skupiny dat. Pro odvození geometrie modelu a jeho hydrografických parametrů byly použity dva typy výškových dat – data SRTM (celosvětový výškopis NASA v rozlišení 3x3“) a vrstevnice ZABAGED (výškopis státního mapového díla ČR v měřítku 1:10 000). Pro odvození parametrů krajinné sféry byla použita data CORINE Land Cover, účelově vytvořená geodatabáze land-use v měřítku 1:5 000, Půdní mapa ČR, bonitované půdně-ekologické jednotky a lesní typologické mapy. Vzhledem k praktickému zaměření studie byla použita data lišící se nejen rozlišením prostorové i atributové složky, ale i účelem použití. Jsou to však jediná obecně dostupná data pokrývající území ČR, která mohou být pro srážkoodtokové modelování použita.

Srovnání modelů založených na výše zmíněných datech probíhá formou porovnání modelovaných hydrogramů ze dvou srážkových epizod (přívalová a regionální srážka) a jednoduché návrhové srážky pro ilustraci chování jednotlivých modelů. Hydrogramy jsou srovnávány navzájem a poté s reálným průtokem měřeným v závěrovém profilu modelového povodí. Jako modelové povodí bylo použito povodí Lubiny o velikosti cca 160 km², které má výraznou výškovou členitost a variabilní využití země, takže srovnání nebylo omezeno na jeden typ krajiny.

Práce je členěna do tří částí. V první části je shrnuta teoretická část srážkoodtokového modelování řešící vstupní data pro prostorově založené srážkoodtokové modely a využití geoinformačních technologií v hydrologickém modelování. Ve druhé části je popsána metodika použitá pro modelování, jsou specifikována použitá geodata a charakterizováno modelové povodí. Třetí část práce je věnována srovnávání výsledků ve dvou kapitolách. V první dochází ke srovnání modelů pro jejichž odvození byla použita rozdílná výšková data a odlišují se tedy svou geometrickou stavbou a hydrografickými parametry. Podklady pro odvození parametrů metody řešení efektivní srážky (SCS-CN) jsou pro všechny modely stejné a samotné parametry se liší pouze tehdy, je-li jejich odvození ovlivněno geometrickou složkou modelu. Ve druhé kapitole jsou srovnávány modely, které mají stejný geometrický základ a liší podkladovými daty pro odvození parametrů krajinné sféry pro použitou metodu řešení efektivní srážky (SCS-CN).

V závěru jednotlivých kapitol jsou diskutovány výsledky srovnávání jednotlivých modelovaných hydrogramů a důvody jejich ovlivnění vstupními geodaty. Řešena je také otázka možnosti kalibrace modelů metodou předchozích vláhových podmínek. V závěru práce jsou pak shrnuty poznatky z použití zmíněných geodat pro stavbu semidistribuovaných srážkoodtokových modelů a z ovlivnění modelovaných hydrogramů těmito vstupními geodaty na modelovém povodí Lubiny.

Klíčová slova: Srážkoodtokové modelování, semidistribuovaný model, geodata, prostorové rozlišení, SCS-CN, HEC-HMS

Abstract

On an example of a case study, the thesis studies the use of geodata of different resolution for the creation of a semi-distributed rainfall-runoff model. Two groups of data were used as the input data. Geometry and hydrographic parameters of a model were derived from two elevation data sources: SRTM (hypsometry in the resolution of 3x3" provided by NASA) and ZABAGED contour lines (hypsometry from a Czech topographic map 1:10 000). Landscape parameters were derived from CORINE Land Cover database; a purposefully created land-use geodatabase on a scale of 1:5 000; a soil map of the Czech Republic; estimated pedologic-ecological units and forest typological maps. With regard to practical application of the study, the data vary not only in the resolution of spatial and attribute components, but in the purpose of their application as well. However, these are the only data available covering the territory of the Czech Republic convenient for rainfall-runoff modeling.

The comparison involved modelled hydrograms of two rainfall episodes (severe storms and regional rainfall events) and a simple design rainfall illustrating the performance of individual models. The hydrograms were compared both mutually and with real discharge measured at the gauge-station of the modelled basin. A model basin was Lubina River basin covering the area of c. 160 km², characterized by significant elevation heterogeneity and land-use variability.

The thesis is divided into three parts. The first part theoretically discusses input data for spatially based rainfall-runoff models as well as the use of geoinformation technologies in hydrological modeling. The second part focuses on modeling methodology description, used geodata specification and model basin characterization. The comparison of results is presented in two chapters of the third part of the thesis.

The first of the chapters brings the comparison of models varying in geometry and hydrographic parameters since they were derived from different elevation data. Data for the parameters used in the SCS Curve Number Method were identical for all the models; individual parameters differed in case their derivation had been affected by the model geometric component. The latter chapter presents the comparison of models of identical geometric base but different data for the derivation of landscape parameters for the SCS Curve Number Method.

The comparison results and the impact of input geodata on individual modelled hydrograms are discussed in the conclusion of individual chapters. The issues of model calibration by means of the antecedent moisture condition method (AMC) are discussed as well. The thesis conclusion part summarizes the knowledge on geodata used for the creation of semi-distributed rainfall-runoff models and the impact of these input geodata on modelled hydrograms shown on the model of the Lubina River basin.

Key words: Rainfall-runoff modeling; Semi-distributed model; Geodata; Spatial resolution; SCS-CN method; HEC-HMS.

Prohlašuji, že jsem celou disertační práci vypracoval samostatně, s použitím uvedené literatury, v souladu se směrnicí děkana č. 1//2010 Disertační práce a autoreferát a v souladu se Studijním a zkušebním řádem pro studium v doktorských studijních programech Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava.

V souladu s §47a zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů souhlasím s publikováním textu své práce na webové stránce HGF VŠB-TU Ostrava.

V Ostravě 29. března 2010

Mgr. Martin Adamec

Motivace

V souvislosti s probíhajícími klimatickými změnami a jejich vlivem na hydrologické poměry ve střední Evropě nabývá na významu studium hydrologické odezvy krajiny na extrémní meteorologické události. Hlavním cílem tohoto studia je pak předcházení ekonomickým či dokonce lidským ztrátám způsobeným povodní.

Hydrologické modelování v jeho numerické počítačové podobě je v současné době aktuálním nástrojem pro studium zmíněné hydrologické odezvy. Se vzrůstající mírou distribuovanosti, související se vzrůstající mírou podrobnosti dostupných referenčních i aplikačně závislých geodat a vzrůstajícím výkonem počítačů, vyvstává otázka vlivu podrobnosti použitých geodat na samotné hydrologické modelování. Zda je však nutné odlišit účel použití hydrologického modelu. V případě použití pro operativní předpovědní praxi velkých povodí s dostupnými daty pro pravidelnou kalibraci modelu je upřednostňována rychlost výpočtu a není nutno dopodrobna řešit odezvu malých dílčích povodí. V případě studia vlivu změn v krajině na hydrologickou odezvu či řešení přívalových srážek na malých povodích je nutno zaměřit pozornost na krajinně homogennější celky a podrobnost použitých geodat tedy nabývá na významu.

Účelem práce bylo zjistit, zda při použití semidistribuovaného srážkoodtokového modelu hraje podrobnost použitých vstupních geodat takovou roli, aby bylo nutno při řešení podobných povodí uvažovat o použití přesnějších datových vstupů.

Důvodem pro provedení tohoto výzkumu byly práce zabývající se použitím modelů pro studium vlivů změn v krajině na odtok (např. Adamec et al. 2006, Unucka et al. 2007), kdy bylo potřebné zjistit citlivost semidistribuovaných modelů na použitá geodata, která jsou v ČR běžně dostupná a v praxi používána. Nedostatečná úroveň rozlišení ve vstupních geodatech v takových případech by mohla vést k nedostatečnému či chybnému popisu složek krajinné sféry studovaného povodí a tím k chování modelu odlišného od reálného povodí. Vzhledem k tomu, že při modelování změn v krajině není možné po provedení změny kalibrovat model na průtok v závěrovém profilu, model vycházející z takových geodat by pak pro tyto účely nebyl vhodný. Dalším důvodem byly práce řešící hydrologické modelování v oblastech s malou dostupností dat, kdy bylo nutno vycházet z globálně dostupných digitálních modelů terénu a satelitních snímků.

Na tomto místě bych rád ještě jednou poděkoval všem, kteří nezištně věnovali svůj čas a zkušenosti při konzultacích a přispěli tak k dokončení práce v této podobě, především týmu hydrologů z VŠB-TU Ostrava a pobočky ČHMÚ v Ostravě.

Obsah

1	Seznam obrázků	3
2	Seznam tabulek	6
3	Seznam symbolů, zkratk a značek.....	7
4	Úvod	11
5	Současný stav problematiky	12
5.1	Vymezení pojmu model/modelování.....	12
5.1.1	Pojem „model“	13
5.1.2	Pojem „modelování“	14
5.1.3	Pojem „simulace“	15
5.1.4	Shrnutí.....	15
5.2	Všeobecná klasifikace modelů.....	16
5.3	Klasifikace dle jednotlivých hledisek	19
5.4	Fáze modelování	23
5.5	Matematické modely v hydrologii	24
5.5.1	Základní dělení.....	24
5.5.2	Rozšiřující dělení.....	25
5.5.3	Metody řešení.....	26
5.5.4	Praktické přístupy k rozdělení modelů v hydrologii.....	27
5.6	Prostorově založené hydrologické modelovací systémy	29
5.7	Vstupní geodata pro hydrologické modelování	30
5.8	Použití geoinformačních technologií pro hydrologické modelování.....	32
5.8.1	Preprocessing.....	33
5.8.2	Postprocessing.....	35
5.8.3	Propojení hydrologických modelů a GIS.....	37
6	Cíl práce.....	41
7	Metodika řešení.....	42
7.1	Srážkoodtokové modelování.....	42
7.1.1	Použitý modelovací systém	43
7.1.2	Komponenty řešení srážkoodtokového procesu	44
7.1.3	Model výpočtu objemu odtoku / odtokové ztráty	45
7.1.4	Model přímého odtoku	48
7.1.5	Model hydraulické transformace v korytech.....	50
7.1.6	Model podzemního (základního) odtoku	51
7.2	Použitá geodata	52
7.3	Použitá geoinformační technologie	54
7.3.1	Digitální modely terénu.....	54
7.3.2	Geografické informační systémy.....	54
7.3.3	Dálkový průzkum Země	54
7.4	Modelové povodí	55
7.4.1	Hydrologie.....	55
7.4.2	Klima.....	56
7.4.3	Geomorfologie.....	57
7.4.4	Geologie	57
7.4.5	Půdy	58
7.4.6	Vegetace	59
8	Stavba srážkoodtokového modelu	60
8.1	Zpracování povodí a odtokové sítě analýzou povrchu	60
8.1.1	Tvorba a úprava digitálního modelu terénu	60
8.1.2	Vyplnění bezodtokých oblastí	64
8.1.3	Směr odtoku	65
8.1.4	Koncentrace odtoku.....	66
8.1.5	Definice odtokové linie	66
8.1.6	Identifikace odtokové linie	67
8.1.7	Vektorizace odtokové linie	68
8.1.8	Stanovení povodí.....	68
8.1.9	Vektorizace povodí.....	69
8.2	Odvození hydrografických parametrů	69
8.3	Odvození parametrů krajinné sféry.....	72

8.3.1	Odvození HSP pro zemědělské půdy.....	73
8.3.2	Odvození HSP pro lesní půdy.....	75
8.3.3	Odvození HSP z mapy půdních typů.....	77
8.3.4	Zpracování dat land-use / land-cover.....	77
8.3.5	Odvození CN.....	77
8.3.6	Odvození průměrné CN pro subpovodí.....	79
8.3.7	Výpočet doby koncentrace.....	80
8.4	Tvorba exportního souboru pro HEC-HMS.....	83
8.5	Import a doplnění parametrů modelu povodí v HEC-HMS.....	85
8.6	Stanovení úhrnu srážek na povodí.....	86
8.7	Použité srážkové epizody.....	87
9	Vliv výškových dat na výsledky srážkoodtokového modelování.....	88
9.1	Metody srovnávání dílčích výsledků.....	88
9.2	Schematizace modelů.....	88
9.3	Výsledky nekalibrovaných modelů SRTM a ZABAGED.....	91
9.4	Zhodnocení dílčích výsledků nekalibrovaných modelů.....	93
9.5	Model z dat SRTM s nižší úrovní rozlišení.....	93
9.6	Srovnání modelovaných výsledků nekalibrovaného modelu SRTM2.....	94
9.7	Zhodnocení dílčích výsledků nekalibrovaného modelu SRTM2.....	96
9.8	Kalibrace modelů dle ukazatele předchozích srážek.....	96
9.9	Srovnání modelovaných výsledků kalibrovaných modelů.....	97
9.10	Zhodnocení výsledků modelů z dat SRTM a ZABAGED.....	99
10	Vliv dat pro odvození parametrů krajinné sféry na výsledky srážkoodtokového modelování.....	100
10.1	Metody srovnávání dílčích výsledků.....	100
10.2	Schematizace modelů.....	100
10.3	Výsledky nekalibrovaných modelů.....	101
10.4	Zhodnocení dílčích výsledků nekalibrovaných modelů.....	103
10.5	Výsledky modelů po kalibraci.....	103
10.6	Zhodnocení výsledků modelů CN10, CN50 a CN 100.....	105
11	Závěr.....	106
12	Informační zdroje.....	108
13	Publikace autora vztahující se k tématu práce.....	117
14	Seznam příloh.....	118

1 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Maketa masívu Ondřejníku, (Přf OU Ostrava).....	16
Obr. 2. Analogový dynamický model pro studium vlnění (DHI 2006).....	17
Obr. 3. Numerický diskretní model pro předpověď počasí ALADIN (ČHMÚ 2006)	18
Obr. 4. Numerický popis systému bez časové složky - digitální model terénu. (ESRI 2006c)	18
Obr. 5. Řešení logické hádanky metodou sítě. Nenumernický model. (Šebej 2003)	18
Obr. 6. Příklad použití lingvistického modelu ve fuzzy modelování – popis saturace jako jednoho z typů nelinearity. (OIRS 2006).....	19
Obr. 7. Grafický model oběhu vody v krajině (USGS 2009)	19
Obr. 8. ER diagram – schematické znázornění entit a vazeb v databázi. (ConceptDraw 2009)	19
Obr. 9. Schéma klasifikace modelů dle jednotlivých hledisek. (Růžičková 2006)	21
Obr. 10. Příklad prostorově a časově nespojitého modelu – hydrodynamický model vodního toku, ustálené proudění. Původně spojitý systém je měřen a modelován v diskretních prostorových (příčné profily) a časových (časový krok měření průtoků) okamžicích. (Brunner 2006)	21
Obr. 11. Schéma využití GIS v procesu hydrologického modelování.....	33
Obr. 12. Stavba modelu koryta a inundační oblasti v ArcView (břehy, proudnice a příčné profily nad digitálním modelem terénu v datovém modelu TIN).....	35
Obr. 13. Příklad možné vizualizace aktuálního hydrogramu, vodního stavu a průtoku k danému závěrovému profilu. (MZE 2006)	36
Obr. 14. Příklad vizualizace - mapa hloubek záplavy s 50% průhledností a s ortofotomapou na pozadí, publikovaná pomocí mapového serveru. (Atlas ŽP 2006)	36
Obr. 15. Nástroje GIS implementované do environmentálního modelu (Embedded GIS in Model).....	37
Obr. 16. Vybrané funkce environmentálního modelování vložené do GIS (Embedded Model in GIS).....	37
Obr. 17. Komunikace GIS a modelu pomocí exportního formátu (Loose coupling).	38
Obr. 18. Částečná integrace modelu do GIS (Tight coupling – partially tight integration).39	
Obr. 19. Znázornění procesů a aplikací integrovaných do prostředí AcrGIS 9 pomocí prostředí Model Builder v aplikaci Map to Map. (Robbayo 2006)	40
Obr. 20. Úplná integrace modelu do GIS (Tight coupling – fully tight integration).	40
Obr. 21. Uživatelské rozhraní a projekt v HEC-HMS 3.4.	43
Obr. 22. Konceptuální model srážkoodtokového procesu v lokálním měřítku	44
Obr. 23. (dle Ward 1975 in Feldman 2000).....	44
Obr. 24. Konceptuální model řešení srážkoodtokových vztahů v HEC-HMS (Feldman 2000).....	45
Obr. 25. Metoda SCS CN (Hrádek, Kuřík 2004).....	46
Obr. 26. Nomogram pro odvození CN dle předchozích vláhových podmínek (Hrádek, Kuřík 2004).....	48
Obr. 27. Grafické zobrazení parametrů rovnice kontinuity v 1D (Jandora et al. 2002)	50
Obr. 28. Grafické zobrazení implementace recesní metody odvození základního odtoku v HEC-HMS (Feldman 2000).....	52
Obr. 29. Půdní typy na povodí Lubiny (upraveno podle AOPK 2008).....	58
Obr. 30. Postup stanovení povodí a odtokových linií z DMT. (ESRI 2006 b).....	60

Obr. 31. Příčný profil digitálním modelem terénu v místě „vypalovaného“ vodního toku a srovnání technik.	62
Obr. 32. Řez digitálním modelem terénu v místě chybně interpolované výšky – chyba SINK. (ESRI 2006a)	64
Obr. 33. Princip odvození směrů odtoku a jejich kódování ve výsledném rastru. (ESRI 2006 b)	66
Obr. 34. Princip stanovení koncentrace odtoku z rastru směru odtoku. (ESRI 2006b).....	66
Obr. 35. Klasifikace odtokových linií kódem řádu toku. (ESRI 2006b)	67
Obr. 36. Průběh vektorizace „soutoků“ odtokových linií pomocí funkcí „Stream to Feature (Streamline)“ a „Convert Raster to Feature (Gridline)“. (ESRI 2006d).....	68
Obr. 37. Dílčí subpovodí definovaná na základě rastru směru odtoku a rastru identifikovaných úseků odtokových linií. (ESRI 2006b)	69
Obr. 38. Princip odvození nejdelší údolnice. Krok 1 – výpočet vzdálenosti k závěrovému profilu daného subpovodí . (Olivera 2009).....	70
Obr. 39. Princip odvození nejdelší údolnice. Krok 2 – výpočet vzdálenosti k rozvodnici daného subpovodí. (Olivera 2009).....	71
Obr. 40. Princip odvození nejdelší údolnice. Krok 3 – součet vzdáleností k závěrovému profilu (FLDS) a k rozvodnici (FLUS) daného subpovodí a identifikace linie s nejvyšší hodnotou součtu. (Olivera 2009).....	71
Obr. 41. Vytvoření schematizace a legendy pro HEC-HMS v ArcView 3.2	84
Obr. 42. Basin model povodí Lubiny v HEC-HMS vytvořený na základě importu výměnného formátu z preprocessingu v ArcGIS a HEC-GeoHMS.	85
Obr. 43. Prostorová distribuce srážek na povodí Lubiny na základě metody Thiessenových polygonů (Gage Weights Meteorologic Model).	86
Obr. 44. Rozložení srážek dle radarového odhadu v době kulminace srážkové epizody 24. 9. 2007 ve 20:00. (červeně a žlutě – zaznamenané srážky dle intenzity, černý obrys – modelové povodí). Zdroj dat ČHMÚ.....	87
Obr. 45. Srovnání odvozených odtokových linií a subpovodí z DEM ZABAGED a SRTM (též v Přílohách 11 a 12).	89
Obr. 46. Srovnání rozvodnice z referenčních dat DIBAVOD (VÚV TGM, 2009) s odvozenými rozvodnicemi z dat SRTM a ZABAGED v problémové oblasti dolního toku Lubiny.....	90
Obr. 47. Srovnání odtokových linií odvozených z dat ZABAGED a SRTM. Oblast horního toku Lubiny, kde došlo v modelu SRTM ke splnutí dvou rovnoběžných údolí z důvodu malého prostorového rozlišení výškových dat.	91
Obr. 48. Modelované hydrogramy při použití 24 hodinové návrhové srážky.	92
Obr. 49. Modelované hydrogramy při použití reálné srážky.	92
Obr. 50. Schematizace modelu z dat SRTM s menší podrobností (model SRTM2).	94
Obr. 51. Srovnání modelovaných hydrogramů při použití návrhové srážky. Srovnávané modely z dat SRTM s rozdílnou podrobností schematizace.....	95
Obr. 52. Srovnání modelovaných hydrogramů při použití reálné srážky. Srovnávané modely z dat SRTM s rozdílnou podrobností schematizace.....	95
Obr. 53. Modelované hydrogramy kalibrovaných modelů. Srážková epizoda 15. – 28. 6. 2009 – přívalová konvektivní srážka.	98
Obr. 54. Modelované hydrogramy kalibrovaných modelů. Srážková epizoda 1. – 15. 9. 2007 (regionální srážka).	98
Obr. 55. Hodnoty CN odvozené pro jednotlivé modely.	101
Obr. 56. Modelované hydrogramy při použití 24 hodinové návrhové srážky.	102

Obr. 57. Modelované hydrogramy při použití reálné srážky.....	103
Obr. 58. Modelované hydrogramy kalibrovaných modelů. Srážková epizoda 15. – 28. 6. 2009 – přívalová konvektivní srážka.....	104
Obr. 59. Modelované hydrogramy kalibrovaných modelů. Srážková epizoda 1. – 15. 9. 2007 – regionální srážka.....	105

2 SEZNAM TABULEK

Tab. 1. Dělení metod použitých v HEC-HMS. (Feldman 2000)	28
Tab. 2. Příklady hydrologických modelovacích systémů založených na prostorové bázi a umožňujících propojení s geografickým informačním systémem (upraveno dle Marsik 2008).....	29
Tab. 3. Úprava AMC podle UPS (upraveno podle Hrádek, Kuřík 2004).....	47
Tab. 4. Hydrologické charakteristiky vztažené k závěrovému profilu Petřvald (HMÚ 1967)	55
Tab. 5. Charakteristiky klimatických oblastí povodí Lubiny (dle Quitt 1971).....	56
Tab. 6. Určení hydrologické skupiny půd pomocí HPJ (Hrádek, Kuřík 2004)	73
Tab. 7. Hydrologická skupina půd pro konverzi na příslušnou hlavní půdní jednotku.	75
Tab. 8. Hydrologické skupiny půd (Hrádek, Kuřík 2004, Janeček 2002, Kulhavý, Kovář 2000, Maidment 1993).....	76
Tab. 9. Hydrologická skupina půd pro příslušný soubor lesních typů	76
Tab. 10. Hydrologická skupina půd pro příslušný půdní typ (subtyp) – převod jednotek Půdní mapy ČR na HPJ.	77
Tab. 11. Průměrná čísla odtokových křivek pro PVP II (upraveno podle Hrádek, Kuřík 2004)	78
Tab. 12. Srovnání subpovodí a odtokových linií odvozených z dat ZABAGED a SRTM.	89
Tab. 13. Srovnání parametrů modelovaných hydrogramů z nekalibrovaných modelů založených na datech SRTM a ZABAGED (kulminační průtok reálné srážky - $139 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).....	91
Tab. 14. Parametry subpovodí modelu z dat SRTM s menší podrobností (model SRTM2)	93
Tab. 15. Srovnání parametrů modelovaných hydrogramů z nekalibrovaných modelů SRTM, SRTM2 a ZABAGED (kulminační průtok reálné srážky - $139 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)... ..	94
Tab. 16. Hodnoty UPS pro jednotlivé použité srážkoměrné stanice. Zdroj dat ČHMÚ.	97
Tab. 17. Hodnoty kulminačních průtoků a časy kulminace pro použité srážkoodtokové epizody.....	97
Tab. 18. Přehled označení a datových zdrojů modelů použitých pro srovnání.	100
Tab. 19. Srovnání parametrů modelovaných hydrogramů z nekalibrovaných modelů založených na datech SRTM a ZABAGED (kulminační průtok reálné srážky - $139 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).....	102
Tab. 20. Hodnoty kulminačních průtoků a čas kulminace pro použité srážkoodtokové epizody.....	104

3 SEZNAM SYMBOLŮ, ZKRATEK A ZNAČEK

0D	bezrozměrný
1D	jednorozměrný
2,5 D	dvourozměrný s parametrizovaným třetím rozměrem
2D	dvourozměrný
3D	třírozměrný
AGNPS	Agricultural Non-Point Source
ALADIN	Aire Limitée, Adaptation Dynamique, Development International
AMC	Antecedent Moisture Conditions
ANSWERS	Areal Non-point Source Watershed Environmental Response Simulation
ANUDEM	The Australian National University Digital Elevation Model
AOPK	Agentura ochrany přírody a krajiny
API	Antecedent Precipitation Index (ukazatel předchozích srážek)
ArchHydro	datový model pro systematický popis vodohospodářských objektů a dat založený na softwaru firmy ESRI
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
ASR	Agricultural Research Service
AVSWAT	ArcView Soil and Water Assessment Tool
BPEJ	Bonitované půdně ekologické jednotky
CASC2D	Cascade Two Dimensional (2D) Model
CN	Curve Number (SCS metoda odvození odtokové ztráty)
CN100	Označení modelu vytvořeného z dat CORINE Land Cover a Půdní mapy ČR 1:100 000 (pro potřeby této práce)
CN5	Označení modelu vytvořeného z dat ZABAGED a BPEJ v kombinaci s LT (pro potřeby této práce)
CN50	Označení modelu vytvořeného z dat CORINE Land Cover a Půdní mapy ČR 1:50 000 (pro potřeby této práce)
CORINE	Coordinate Information on the Environment
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
ČR	Česká republika
ČÚZK	Český úřad zeměměřický a katastrální
DEM	Digital Elevation Model
DHI	Danish Hydraulic Institute
DHSVM	Distributed Hydrology Soil Vegetation Model
DIBAVOD	Digitální báze vodohospodářských dat
DMT	digitální model terénu
DMÚ25	Digitální model území v měřítku 1:25 000 (vojenské mapové dílo)

DPZ	Dálkový průzkum Země
DSS	Data Storage System
EGM96	Earth Gravitational Model 1996
EPA	Environmental Protection Agency
ESRI	Environmental Systems Research Institute
FEFLOW	Finite Element Subsurface Flow System
FG	fyzickogeografický
FLDS	Flow Length Downstream
FLUS	Flow Length Upstream
GCM	globální cirkulační modely
GFD	Geophysical Fluid Dynamics
GFS	Global Forecast System
GIS	geografické informační systémy
GISS	Goddard Institute for Space Studies
GIT	geoinformační technologie
GSSHA	Gridded Surface / Subsurface Hydrologic Analysis
GUI	Graphic User Interface
HEC	The Hydrologic Engineering Center
HEC-DSSVue	Hydrologic Engineering Center -Data Storage System Visual Utility Engine
HEC-GeoHMS	Hydrologic Engineering Center -Geospatial Hydrologic Modeling System
HEC-HMS	Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System
HEC-RAS	Hydrologic Engineering Center's River Analysis System
HEC-USACE	Hydrologic Engineering Centre - U.S. Army Corps of Engineers
HPJ	hlavní půdní jednotka (část kódu BPEJ)
HSP	hydrologická skupina půd
CH6, CH7	Chladná oblast, podoblasti číslo 6 a 7. Klimatická klasifikace ČR dle Quitt 1971.
IDW	Inverese Distance Weighted
kap.	kapitola
KINEROS	Kinematic Runoff and Erosion Model
LC	Land Cover
LT	Lesní typ, lesní typologie
LU	Land Use
LULC	Land Use Land Cover
m n.m.	metrů nad mořem

MFD	Multiple Flow Direction
MIKE-SHE	modelovací systém - DHI
MKSP	Morfogenetický klasifikační systém půd
MM5	Mesoscale Modeling 5
MODFLOW	Modular Three-Dimensional Groundwater Flow Model
MT2, MT9, MT10	Mírně teplá oblast, podoblasti číslo 2, 9 a 10. Klimatická klasifikace ČR dle Quitt 1971.
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NEXRAD	Next Generation Radar
Obr.	obrázek
PRMS	Precipitation-Runoff Modeling Systém
PVP	předchozí vláhové podmínky
Q	průtok [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$] (ČSN 75 1400)
Q ₁	jednoletý průtok [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$] (ČSN 75 1400)
Q ₁₀	desetiletý průtok [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$] (ČSN 75 1400)
Q ₁₀₀	stoletý průtok [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$] (ČSN 75 1400)
Q ₅₀	padesátiletý průtok [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$] (ČSN 75 1400)
Q _a	průměrný průtok [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$] (ČSN 75 1400)
R, RC	Storage Coefficient, doba zdržení vody v povodí
RAS	River Analysis Systém
REV	Reprezentativní elementární objem
SAC-SMA	The Sacramento Soil Moisture Accounting Model
SCS	Soil Conservation Service
SFD	Single Flow Direction
SHE	Système Hydrologique Européen
SHC	HEC's standard hydrologic grid
SIMWE	Simulated Water Erosion
S-JTSK	Souřadnicový systém jednotné trigonometrické sítě katastrální
SLT	Skupina lesních typů
SMA	Soil Moisture Accounting
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission, NASA
SRTM	Označení modelu vytvořeného z dat SRTM (pro potřeby této práce)
SRTM2	Označení modelu vytvořeného z dat SRTM v nižším rozlišení (pro potřeby této práce)
STATSGO	State Soil Geographic Database
STG	Skupina typů geobiocénu

SWAT	Soil and Water Assessment Tool
Tab.	tabulka
TC	Time of Concentration
TIN	Triangulated Irregular Network
TOPMODEL	Topography Based Runoff Prediction Model
UH	Unit Hydrograph (jednotkový hydrogram)
ÚHUL	Ústav pro hospodářskou úpravu lesů
UPS	Ukazatel předchozích srážek
US	United States
V.Ú.V TGM	Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka
VŠB-TU	Vysoká škola báňská - Technická univerzita
WGS	World Geodetic System
WHI	Waterloo Hydrogeologic Inc.
WMS	Watershed Modeling System
ZABAGED	Základní báze geografických dat
ZABAGED	Označení modelu vytvořeného z dat ZABAGED (pro potřeby této práce)

4 Úvod

Při rozvoji modelování hydrologických procesů od typu black-box směrem k semidistribuovaným a distribuovaným typům modelů dochází ke změně požadavků na charakter vstupních geodat. Zatímco při použití hydrologických modelů typu black-box není kladen důraz na prostorovou složku geodat, s rostoucí distribuovaností modelů nabývají geodata s potřebnou úrovní rozlišení na významu. Jejich analýzou je možno získat informace o dílčích povodích a jednotlivých úsecích odtokových linií, jež jsou potřeba pro co nejlepší reprezentaci reálného stavu krajinné sféry studovaných subpovodí.

Pro tyto analýzy je efektivní využívat geoinformační technologie (GIT). Základní geoinformační technologií pro hydrologické modelování jsou digitální modely terénu (DMT). Jejich analýzy jsou používány pro modelování odtokových poměrů v povodí a drenážní sítě a pro odvození geometrických vlastností srážkoodtokového modelu. Další potřebnou geoinformační technologií jsou geografické informační systémy (GIS), které je možné využít pro zpracování geodat o půdním pokryvu a vegetačním krytu a k odvození jejich parametrů potřebných pro stavbu modelu daného povodí. Také je tato technologie nepostradatelná pro determinaci prostorového rozložení srážek na povodí, a to jak při zpracování radarových odhadů srážek, tak v interpolaci bodově měřených hodnot pomocí srážkoměrných stanic. V neposlední řadě je využívána pro geovizualizaci modelovaných hodnot průtoků, rozlivů a případně dalších modelovaných parametrů. Je možno využít také technologií dálkového průzkumu Země (DPZ) např. ke zpracování leteckých či družicových snímků pro identifikaci prvků krajinného pokryvu nebo pro získání geodat popisujících geometrii vodního toku a jeho okolí.

Využití těchto technologií pro zpřesnění a zvětšení podrobnosti hydrologických modelů by mohlo umožnit přesnější popis složek krajinné sféry v modelech a následně lepší vystižení hydrologické odezvy krajiny na srážkovou událost. V této práci je na případové studii v povodí Lubiny řešen příspěvek k poznání reálnosti výše zmíněného předpokladu a jsou naznačovány skutečnosti, které mohou snahu o takové zlepšení výsledků modelu.

5 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

Od roku 1990 dochází v České republice k postupnému rozšiřování jak samotného hydrologického modelovacího software, tak geoinformačních technologií vhodných pro přípravu vstupních geodat a následné analýzy.

V přírodních vědách obecně se modelování krajinných procesů stává stále častějším nástrojem v analýze chování krajinných segmentů či systémů, přičemž převládá matematické modelování, tzn. nahrazování objektů, jevů a procesů matematickým vyjádřením pomocí soustavy rovnic a následným uložením do paměti počítače (počítačové modelování).

Dalším trendem je vznik modelovacích softwarových systémů, které kombinují objektový a procesní náhled na systém (tj. kombinaci modelů statických a dynamických). Tyto modelovací systémy jsou zaměřeny na studium určité skupiny souvisejících procesů (např. srážkoodtokový proces, proudění podzemní vody, svahové procesy apod.) na vymezeném studovaném prostoru. Tyto systémy není možné zařadit do níže zmíněných klasifikací, neboť mají implementovány pro každý dílčí proces paletu modelů (např. empirické i konceptuální, fyzikálně podložené i aproximace) a je jen na uvážení operátora které z nich použije a jakou míru abstrakce bude mít výsledný celkový model (zda bude sdružený, semidistribuovaný či distribuovaný). Zařadit do standardně používaných klasifikací lze zde jen dílčí modely použité pro jednotlivé základní procesy či objekty, z nichž se modelovací systém skládá, ale ne již výsledný model studovaného území.

Přes veškeré technologické pokroky v matematickém modelování a se vzrůstající uživatelskou přívětivostí modelovacích systémů je potřeba si mnohem více uvědomovat, že „všechny modely jsou nedokonalé nástroje s chybami v reprezentaci reality a s limity v dostatečnosti vstupních dat. Uživatel modelu musí interpretovat výsledky simulace. Počítač neprovádí validaci modelu, pouze usnadňuje výpočty a záznamy“ (Adrien 2000).

5.1 Vymezení pojmu model/modelování

Pojem model/modelování je v současné době často používán a význam tohoto termínu se stále rozšiřuje téměř ve všech oblastech lidských činností. Díky tomu se jakýkoliv pokus o všeobecnou klasifikaci zahrnující všechny potenciální oblasti stává až příliš obecným a na druhé straně neustále přibývá množství konkrétních klasifikací v jednotlivých oborech a dle jednotlivých hledisek.

Situaci ještě více komplikuje prolínání dříve jednoznačně vymezených a klasifikovatelných modelů (ve smyslu nástrojů pro modelování) a vytváření modelovacích systémů (softwarových produktů) obsahujících nástroje a metody napříč zažitými klasifikacemi.

Z tohoto důvodu je obtížné vybrat z nabídky klasifikací takovou, aby byla schopná vystihnout použitý modelovací systém. Jelikož toto rozhodnutí bylo nutno učinit, byly pro tuto práci zvoleny dva způsoby – jedna velmi obecná klasifikace a na druhé straně podrobné členění matematické modelů v hydrologii. Vybrané klasifikace byly doplněny o několik dalších dělení modelů běžně používaných v geovědách a to dle jednotlivých úhlů pohledu na modelování.

5.1.1 Pojem „model“

Při vymezení pojmu model lze shledat mnoho přístupů, vycházejících z různých úhlů pohledu, např.

- Model je systém, který více či méně zjednodušeně napodobuje určitý reálný systém – jeho chování, fyzikální a chemické vlastnosti, geometrii, statické a dynamické vlastnosti atd. (Rapant 2006)
- Model je účelově vytvořený systém na základě podobnosti s reálným systémem. Tento vytvořený systém má umožnit řešení problémů definovaného na originálu. (Burý 1989)
- Model je zjednodušené vyjádření reality pro účely popisu, vysvětlení, prognózy nebo plánování. (Voženílek 2009)
- Model je zmenšená kopie systému, mentální konceptualizace, empirický soubor vazeb nebo série matematických a statistických rovnic reprezentující systém. V každém případě se jedná o nedokonalou reprezentaci, avšak cenný nástroj pro studium nebo predikci různých druhů situací a k obdržení odpovědi jejíž zjišťování měřeními nebo pozorováním skutečného systému by bylo nepraktické. Příchod rychlých počítačů (hardware) a vývoj pokročilých programů (software) rozšířil všechny zmíněné vlastnosti modelů. Počítačové modely jsou opravdové elektronické laboratoře k provádění experimentů, evaluaci scénářů, plánování a navrhování projektů. (Adrien 2000)
- Modely, v širokém smyslu, jsou zjednodušené popisy existujících fyzických systémů. Jakýkoliv výzkum systému půdy nebo podzemní vody, který je více než jednoduchý sběr a ukládání tabelárních dat zahrnuje modelování. Původní konceptuální model, popisující systém půdní a podzemní vody je testován sběrem dat. Pokud data potvrdí původní koncept, je přijat, pokud ne, musí být revidován. Význam termínu model se mění v závislosti na kontextu v jakém je používán. Většina modelů spadá do jedné z následujících kategorií:
 - kvantitativní popis funkce procesů v systému,
 - zjednodušená fyzická reprezentace systému.
 - matematická reprezentace fyzikálního nebo chemického systému. (Boulding, Ginn 2009)
- Model je formalizované vyjádření teorie, události, objektu, procesu nebo systému používaného pro predikci nebo kontrolu. Experimentální návrh založený na nepřesné situaci, kterou generují pozorovaná data. Typy modelů vyvinuté a používané v geovědách zahrnují měřítkové modely (v nichž je prototyp studovaného objektu zmenšen (zvětšen) do velikosti vhodné pro studium; konceptuální modely, které jsou založeny na pozorování a vyjádření segmentu reálného světa do idealizované formy zachovávající podstatné prvky a pomíjející vedlejší detaily; matematické modely jež jsou abstrakty fyzikálních modelů tím, že nahrazují události, vazby, a/nebo objekty za použití výrazů které používají matematické proměnné, konstanty a parametry. Tato poslední kategorie může být následně dělena na modely deterministických, statistických a stochastických procesů. (Gregorech et al. 2009)

- Model je matematická a/nebo fyzická reprezentace fenoménu reálného světa, která slouží jako podklad (orig. „plan or pattern“) na kterém mohou být identifikovány, analyzovány, syntetizovány a měněny vazby bez narušení procesů v reálném světě. (Vincoli 2000)
- Modely jsou v nejširším významu zjednodušeným funkčním vyjádřením existujícího fyzikálního systému. Model systémově řeší vztah známých vstupů (např. charakteristiky povodí a hydrometeorologické situace) a neznámé hodnoty požadované výstupní veličiny (např. předpověď průtoků) v čase a prostoru. (Unucka 2010)
- Model je každé účelové a zjednodušené zobrazení skutečnosti. V různých vědních disciplínách má slovo model různý význam (slévárenský model, architektonický model, ekonomický model, matematický model, počítačový model, myšlenkový návrh apod.) Přitom výrazové prostředky pro tvorbu modelu mohou být velmi různorodé od fyzických modelů (např. modely budov v architektuře), přes matematicko-logické modely (např. soustavy rovnic), různé grafické modely (např. ikonografické modely), počítačové modely (programy) až po verbální slovní popisy (např. popisy podnikové kultury, procesu učení se apod.). Modelová technika umožňuje promítnutí alternativního vývoje systému pomocí modelového experimentu, umožňuje sledování změn jednotlivých parametrů hodnot prvků i jejich vazeb, vliv změny chování okolí na systém, stabilitu systému apod. Na modelu systému můžeme experimentovat se strukturou systému, jeho prvky i vazbami, okolím systému změnou vstupních parametrů a zkoumáme chování systému na základě změny vstupních parametrů. Na modelu pak zkoumáme zejména souvislosti, příčiny a analogie a hledáme nejlepší řešení systému z hlediska požadovaného cíle systému. Model nemůže nikdy vyjadřovat všechny prvky a vazby zkoumaného systému, protože takový model by byl nepřehledný, výpočetně nezvládnutelný, nezobrazitelný a hlavně „lidský“ nepochopitelný, takže by nesplňoval svůj účel tj. poznat chování systému s možností jej následně ovlivnit. (Molnár 2009)

5.1.2 Pojem „modelování“

Analogicky stejná situace jako u modelování nastává u pojmu modelování:

- Pod pojmem modelování se (v geografii) rozumí fáze procesu poznání, jehož výsledkem je ekvivalence sestaveného modelu a vyšetřovaného systému ve vlastnostech a projevech zvolených za podstatné, s přesností postačující danému účelu. (Voženílek 2009)
- Modelování je proces výběru modelu, jeho sestavení, přetváření, hodnocení a přechod od modelu zpět k reálné skutečnosti. (Voženílek 2009)
- Modelování je specifická forma experimentu, který umožňuje člověku poznávat různé objektivní zákonitosti přírody. (Burý 1989)
- Modelování je kvantitativní nebo matematická simulace systému (fenoménu, události) v modelu, který byl navržen tak, aby adekvátně reprezentoval skutečný systém pomocí

jeho vlastností, zákonitostí a chování. Experiment simulace umožňuje predikci chování reálného systému v různých podmínkách, které by nemohly být snadno studovány v reálném systému. (Adrien 2000)

- Vývoj matematické nebo fyzikální reprezentace teorie, události objektu nebo systému, který zahrnuje všechny nebo některé známé vlastnosti. Modely jsou často používány k testování míry vlivu jednotlivých stupňů (rozsahů) změn jednotlivých součástí na funkci celého systému. (Gregorech 2009)
- Kvantitativní nebo matematická simulace sloužící k predikci nebo popisu chování nebo vazeb vycházející z reálného jevu (události). (Pankratz 2009)
- Výzkumná technika využívající matematické nebo fyzikální reprezentace systému nebo teorie, která zahrnuje všechny nebo některé jeho vlastnosti. Modely jsou často používány k testování vlivu změn v jednotlivých komponentech na chování celého systému. (Vincoli 2000)
- Modelování je proces projektování a konstrukce modelu, která se nikdy neobejde bez ujasnění výchozích premis (předpokladů, hypotéz, teorií). Právě volba výchozích hypotéz tvoří z konstrukce modelu tvůrčí činnost. Identifikace systému a selekce hypotéz vyžaduje nejen dobrou znalost věcné problematiky ale občas i trochu intuice. Na procesu modelování je podstatný účel, pro který model konstruuje tj. na jakou otázku spojenou s vlastnostmi systému nám má dát model odpověď. Ten určuje míru zjednodušení tj. výběr prvků, vazeb a jejich vlastností. Nad jedním systémem pak můžeme definovat nespočet možných modelů podle toho, pro jaký účel model tvoříme resp. na jaké otázky týkající se zkoumaného systému nám má model dát odpověď. (Molnár 2009)

5.1.3 Pojem „simulace“

Dalším pojmem, který je v souvislosti s modelováním používán, je simulace. Tento pojem bývá někdy chápán jako synonymum modelování, ale význam tohoto pojmu je spojen s modelováním procesů, tj. je spojen se získáváním informací o chování systému. Pojem „simulace“ je definován např. takto:

- Proces napodobování (imitace) chování systému pomocí jiného systému, např. pomocí počítačů modelů, a dalších zařízení. (Adrien 2000)
- Reprezentace reálných systémů a fenoménů matematickými modely; provádění experimentů s modely pro pochopení současných nebo budoucích podmínek reálného systému, předpovídat výsledky nebo ověřovat scénáře. (Adrien 2000)

5.1.4 Shrnutí

Již z těchto několika málo pohledů na modelování je patrné, že jakýkoliv pokus o vyjádření (zjednodušení) prvků či procesů reálného světa ať ve fyzické či nehmotné podobě je možné nazvat modelováním.

Převážně je však modelování (v přírodních vědách) chápáno jako metoda pro poznávání a napodobování objektivních zákonitostí přírody s potřebným zjednodušením. Vzniklý model je vytvořen tak, aby se v podstatných charakteristikách shodoval s reálným (modelovaným) systémem, přičemž to, které charakteristiky jsou podstatné, vyplývá z účelu modelování. Tzn. je nutno vybrat pouze charakteristiky ovlivňující studovaný proces a ostatní zanedbat pro zjednodušení systému. Vzniklý model je pak používán pro zjištění charakteristik systému, které by bylo složité odvozovat v reálném světě, nebo pro testování chování systému bez nutnosti měnit originál. V těchto základních bodech se většina definic modelu shoduje.

Větší různorodost se pak vyskytuje u definic pojmu modelování. Zde se v literatuře objevují dva různé přístupy:

- modelování ve smyslu tvorby modelu (tj. procesu poznávání systému a jeho transformace do podoby modelu),
- modelování ve smyslu používání již hotového modelu k ověřování hypotéz o chování celého systému nebo jeho komponent, nebo pro predikci.

Oba tyto přístupy jsou pravděpodobně správné, jde spíše o nedostatek vhodných termínů k rozlišení těchto dvou logických a na sebe navazujících fází jednoho procesu. Nicméně ne všechny definice zahrnují obě tyto fáze.

5.2 Všeobecná klasifikace modelů

Jak bylo již naznačeno v úvodu, v této kapitole byly vybrány dva odlišné způsoby klasifikace modelů, doplněné o další dílčí úhly pohledů na modely v geovědách. V této podkapitole je zmíněno dělení, jehož výhodou je možnost použití na veškeré modely v celé šíři chápání tohoto pojmu a ve všech oborech. Jednotlivý obor nebo skupina oborů (např. geovědy) pak nemusí nutně využít celou šíři klasifikace, jelikož použití některých druhů modelů nemá v oboru opodstatnění (doplněná klasifikace Humusoft 2006).

1. Fyzický

a. Statický

- i. Maketa (model objektu, většinou zmenšený v daném měřítku. V geovědách je možno použít maketu např. horského masívu z vrstevnicových plátů).



Obr. 1. Maketa masívu Ondřejníku, (Přf OU Ostrava)

- ii. Imitace (model objektu, většinou v reálné velikosti, který vystihuje sledovanou vlastnost originálu. Často používán např. ve stavebnictví, kde nahrazuje přírodní materiál umělým při zachování jedné vlastnosti originálu - jeho vzhledu).

b. Dynamický

- i. Analogový (model objektu, zpravidla zmenšený, který zachovává studované funkce originálu, přičemž ke zprostředkování vazeb může být použito originální medium, nebo jeho náhrada podobně funkčním).



Obr. 2. Analogový dynamický model pro studium vlnění (DHI 2006)

- ii. Prototyp (Jedná se model zachovávající parametry a funkčnost budoucího originálního systému. Je používán v průmyslové výrobě pro testování jeho vlastností před fází hromadné výroby).

- 2. **Mentální** (jde o vytvoření představy kombinující obraz modelované reality s individuálním způsobem vnímání konkrétní osoby. Dochází ke zdůraznění procesů a jevů, které daná osoba považuje subjektivně za důležité, např. mentální mapy v kartografii).

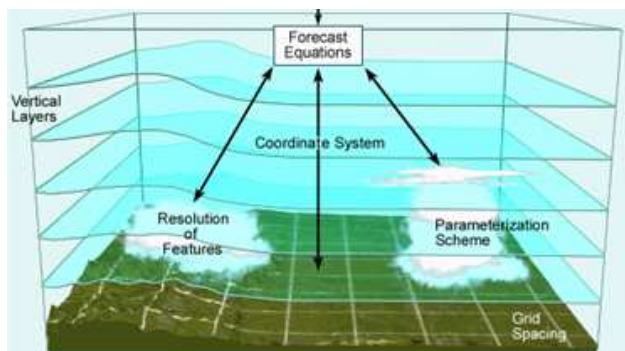
3. Symbolický

a. Matematický

Statický (bez časového rozměru) / Dynamický (uvažuje časový rozměr)

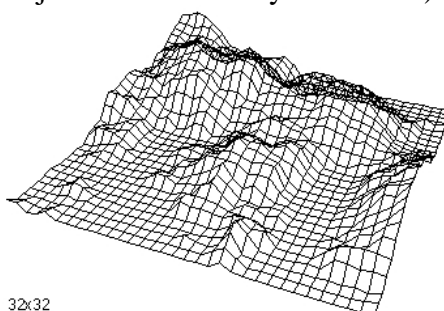
i. Numerický

- 1. Simulační - východiskem dynamického simulačního numerického modelu je soustava rovnic popisujících fyzikální zákony v čase. Dle způsobu nahlížení na prostor a čas je možno simulaci rozdělit na
 - a. Diskrétní (výsledky simulace jsou počítány v předem daném prostorovém/časovém kroku)
 - b. Spojitou (výsledky simulace jsou počítány kontinuálně, je možné je získat v libovolném místě i čase)



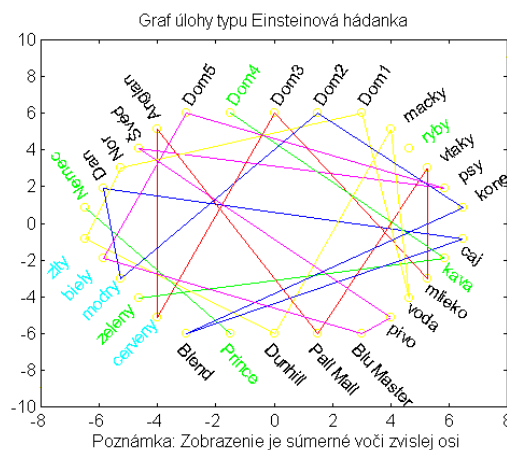
Obr. 3. Numerický diskrétní model pro předpověď počasí ALADIN (ČHMÚ 2006)

2. Jiný numerický (numerický model nesloužící k simulaci, tj. neřeší chování systému čase)



Obr. 4. Numerický popis systému bez časové složky - digitální model terénu. (ESRI 2006c)

ii. Nenumerický (řešení pomocí grafu, také fyzikální modelování)



Obr. 5. Řešení logické hádanky metodou sítě. Nenumerický model. (Šebej 2003)

b. Nematematický

- i. Lingvistický (lingvistický model slovně popisuje systém jako skupinu objektů a pravidel mezi nimi)

IF u je malý THEN y je malý
 IF u je střední THEN y je střední
 IF u je velký THEN y je střední

Kde u je vstupní proměnná a y je výstupní proměnná.

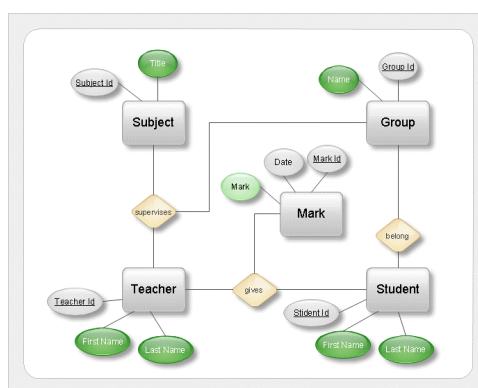
Obr. 6. Příklad použití lingvistického modelu ve fuzzy modelování – popis saturace jako jednoho z typů nelinearity. (OIŘS 2006)

- ii. Grafický (prvky modelované entity jsou nahrazeny grafikou zachovávající hlavní rysy, mohou být znázorněny i vazby)



Obr. 7. Grafický model oběhu vody v krajině (USGS 2009)

- iii. Schematický (schematickým způsobem zobrazuje výčet prvků a vazby mezi nimi. Prvky a druhy vazeb jsou nahrazeny znaky)



Obr. 8. ER diagram – schematické znázornění entit a vazeb v databázi. (ConceptDraw 2009)

5.3 Klasifikace dle jednotlivých hledisek

V této kapitole jsou uvedeny další možné klasifikace dle nejrůznějších úhlů pohledu na modelování. Doplněno dle klasifikace (Růžičková 2006).

Podle charakteru procesu na modelu:

- deterministické – ty se vyznačují jednoznačně přiřazenými příčinami a jejich následky
- stochastické – buď sám zkoumaný problém, nebo metoda řešení mají náhodný charakter
 - o pokud je sám proces stochastický (jsou známy jen pravděpodobnosti, s jakými nastávají jevy na originále, např. výskyt slunečních erupcí.)
 - o pokud jde proces popsat deterministicky, ale některé parametry nebo rušivé vlivy na originálu jsou náhodné (a pokud je nelze zanedbat). Např. turbulentní proudění atmosféry – principy lze popsat soustavou rovnic vyjadřujících fyzikální zákony, ale systém ovlivňuje příliš mnoho náhodných jevů.
 - o řešení deterministických problémů pravděpodobnostními metodami (může jít o jednodušší řešení)

Podle hlediska podobnosti (podobnost mezi originálem a modelem):

- fyzikální (model fyzicky zmenšený/zvětšený napodobující originál, např. experimentální váhový výparoměr s částí pedonu i s vegetací, laboratorní říční koryta pro studium hydrodynamiky toku),
- fyzikálně matematické,
- matematické (systém je popsán pouze soustavou rovnic, např. hydrodynamický model MIKE 11, MIKE 21, meteorologický model ALADIN).

Podle zpracování modelové informace:

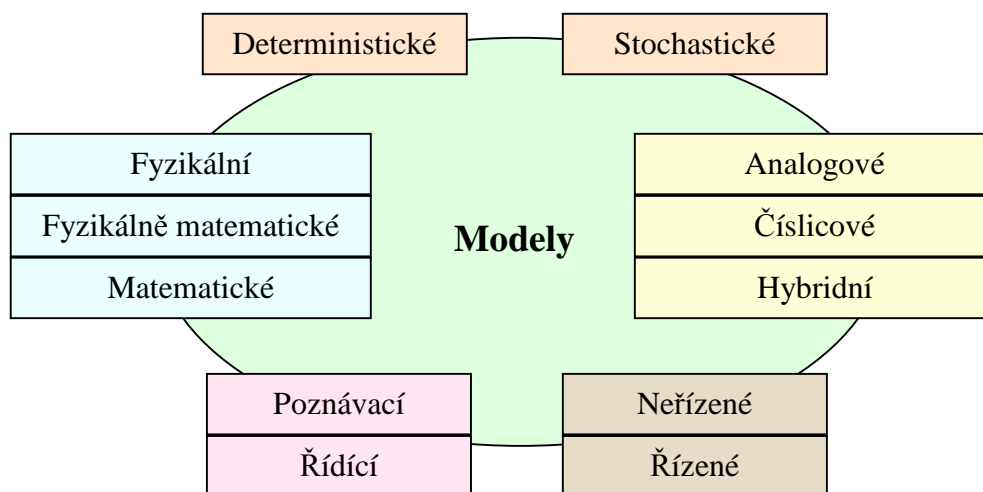
- analogové (při analogovém způsobu vyhodnocení dochází k pozorování modelu (fyzikálního) případně záznamu jeho chování měřicími přístroji),
- číslíkové (výsledkem modelování jsou číselné hodnoty parametrů popisující chování jednotlivých komponent),
- hybridní (kombinace výše zmíněných).

Podle účelu modelu:

- poznávací (model slouží ke studiu chování systému v situacích, které by bylo možno obtížně navozovat v reálném systému – např. reakce srážkoodtokových vztahů povodí na odlesnění v modelu HYDROG, MIKE SHE),
- řídicí (model slouží k vyhodnocení situacích, které nastaly na reálném systému a je potřeba vyřešit nejlepší reakci operátora – např. nalezení optimální reakce vodohospodářské soustavy na srážkovou epizodu v modelu HYDROG).

Z hlediska vnějšího působení (zda je pasivní, nebo se aktivně mění podle podmínek řízení):

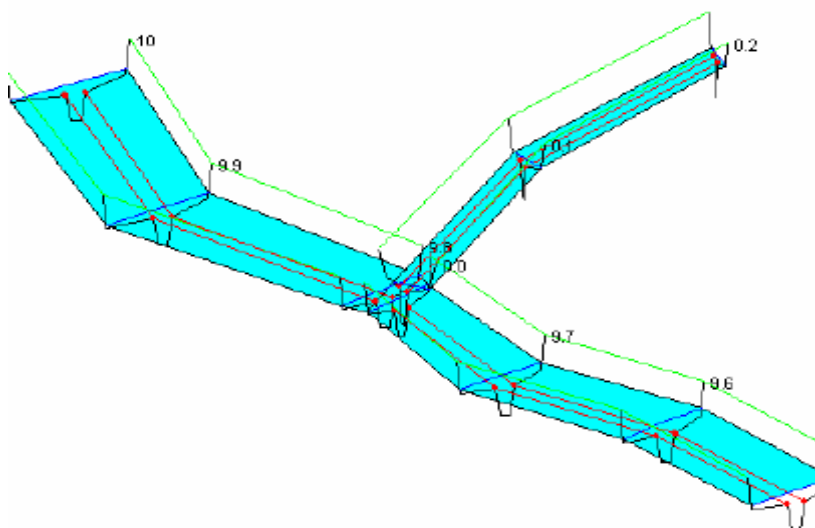
- neřízené (není možné zasahovat do nastavených parametrů – např. odvození odtoku z povodí metodou jednotkového hydrogramu),
- řízené (při procesu modelování lze zasahovat do nastavení parametrů systému – např. odvození odtoku z povodí v modelu HYDROG).



Obr. 9. Schéma klasifikace modelů dle jednotlivých hledisek. (Růžičková 2006)

Z hlediska vyjádření prostoru a času:

- prostorově spojité,
 - prostorově nespojité,
 - časově spojité,
 - časově nespojité,
- (systém je spojitý, je-li měření času/prostoru množinou reálných čísel, nespojitý systém je systém s diskrétním časem/prostorem. Může vzniknout také tak, že veličiny spojitého systému jsou měřeny v diskrétních časových okamžicích),
- ustálené (podmínky modelu jsou v průběhu simulace konstantní),
 - neustálené (dochází ke změně podmínek s časem).



Obr. 10. Příklad prostorově a časově nespojitého modelu – hydrodynamický model vodního toku, ustálené proudění. Původně spojitý systém je měřen a modelován v diskrétních prostorových (příčné profily) a časových (časový krok měření průtoků) okamžicích. (Brunner 2006)

Z hlediska zachování podobnosti modelu:

- úplné – úplná podobnost modelu v prostoru a čase, např. řešení podpovrchového odtoku při srážkoodtokovém modelování napojením na model proudění podpovrchových vod (MIKE SHE + MODFLOW).
- neúplné – částečná podobnost např. nahrazení modelu proudění podpovrchové vody při srážkoodtokovém modelování modelem hypodermického odtoku v kombinaci s metodou podzemní nádrže – viz níže.)
- přibližné – některé závislosti se u modelu vyjadřují přibližně (např. nahrazení subsystému podpovrchové vody modelem „podzemní nádrže“, což je metoda zjednodušující subsystém bezparametrickou metodou (zjednodušení systémem na přítok, akumulaci a odtok bez zadání vlastností systému).

Podle velikosti modelované oblasti (lokální, regionální, globální, příp. mikro-, mezo- a makroměřítek – shoduje se s pojetím velikosti studované oblasti v geografii).

Podle stupně abstrakce od reálného světa

(Ke stupni abstrakce za teoretickým popisem uveden možný příklad abstrakce v oblasti hydrologického modelování).

- Model nultého stupně abstrakce – originál, množství informace je stoprocentní (např. reálné povodí).
- Model prvního stupně abstrakce - přirozený fyzikální model – fyzikální proces se zachovává zcela, včetně nosné látky. Měřítko modelu jsou přibližně jednotková, zjištění hodnoty určité veličiny lze provést měřením. (Je vyčleněna část modelovaného systému - experimentální povodí - na němž jsou prováděna podrobná měření.)
- Model druhého stupně abstrakce – fyzikální proces se zachovává zcela, nebo z části ve struktuře systému, určující jsou zákony fyzikální podobnosti. Některá měřítko modelování nejsou jednotková. Fyzikální podobnost zahrnuje podobnost geometrickou, podobnost fyzikálních vlastností (parametrů systému), podobnost okrajových a počátečních podmínek. (Procesy a vazby zjištěné na experimentálním povodí jsou přeneseny na celé povodí s úpravou dle lokálních fyzikogeografických (FG) podmínek.)
- Model třetího stupně abstrakce – původní fyzikální proces se nahrazuje procesem analogickým. Zachovává se analogie mezi strukturou originálu a modelu. Platí zcela, nebo z části zákony fyzikální podobnosti. Vychází se z podobnosti matematického modelu obou analogických procesů. (Procesy a vazby jsou zjednodušeny a zahrnuty do subsystémů dle konceptuálního modelu, jsou zvoleny metody matematického řešení jednotlivých subsystémů.)
- Model čtvrtého stupně abstrakce – nezachovává podobnost mezi strukturou originálu a modelu. Systém s rozloženými parametry je modelován systémem se soustředěnými parametry. Jednotlivé buňky modelu modelují konečné buňky originálu. (Prostor povodí je rozčleněn do pravidelné sítě (gridu). FG prostředí každé buňky je zastoupeno průměrnou hodnotou měřených parametrů. Jedná se o tzv. distribuovaný model povodí. Je možno jej vybudovat např. v modelovacích systémech TOPMODEL, MIKE SHE, HEC-HMS.)
- Model pátého stupně abstrakce – původní fyzikální proces v systému s rozloženými parametry se studuje na matematickém simulačním modelu jen v uzlových, do nichž jsou soustředěny parametry díla. Určující je matematická podobnost

procesu v bodech, kde se stýkají vstupy a výstupy elementů matematického modelu. (Prostor povodí je rozčleněn do dílčích subpovodí. FG prostředí každého subpovodí je zastoupeno průměrnou hodnotou měřených parametrů za celé subpovodí vztaženou k centroidu (uzlu). Je vybudován síťový model povodí, výpočty parametrů subsystémů jsou řešeny v uzlových bodech, komunikace mezi uzly je řešena po hranách. Jedná se o tzv. semidistribuovaný model povodí. Je možno jej vybudovat např. v modelovacích systémech MIKE SHE, HEC-HMS.)

- Model šestého stupně abstrakce - funkcionální model jednosystémový (jednoprvkový model černé skřínky). Proces modelu je podobný procesu na originálu pouze ve vnějším chování – podobnost funkcionální. Ve vnitřní struktuře se neuvažuje podobnost fyzikální ani matematická. (Prostor povodí je brán jako celek, FG parametry jsou řešeny průměrnou hodnotou za celé povodí. Vstupní informace (srážky) jsou přímo transformovány na výstupní (odtok). Tzv. sdružený model povodí - lumped model.) Lze vybudovat např. v HEC-HMS nebo jeho starší verzi HEC-1. Je možno také zanedbat FG podmínky povodí a vyjít z empirický zjištěných závislostí (black-box model), například dříve používanou metodou jednotkového hydrogramu.)
- Model sedmého stupně abstrakce = funkcionální model dvou černých skříněk – určující je pouze matematická podobnost ve vnějším vzájemném působení podsystémů (např. působení teploty jednoho tělesa na jiný).
- Model osmého stupně abstrakce = funkcionální model mnoha černých skříněk a vzájemné působení mezi nimi.
- Model devátého stupně abstrakce = dvoumnožinový hierarchický funkcionální model, u něhož dochází ke vnitřním vzájemným vazbám v každé z obou množin, a k výslednému působení jedné množiny černých skříněk na množinu druhou.
- Model desátého stupně abstrakce = funkcionální modely hierarchicky organizované – modely tohoto typu jsou charakteristické zejména pro složité biologické systémy. (Modely sedmého a vyššího stupně se v hydrologickém modelování nepoužívají. Teoreticky by bylo možné propojit black-box nebo sdružené srážkoodtokové a hydrodynamické modely s modely proudění podzemní vody a vytvořit model vyššího stupně abstrakce. Zmíněná propojení jsou v současné době řešena na úrovni čtvrtého stupně abstrakce (distribuované modely – např. propojení MIKE SHE a MODFLOW), což přináší lepší výsledky díky možnosti zohlednění FG podmínek.)

5.4 Fáze modelování

V této kapitole jsou zmíněny pojmy vycházející z jednotlivých fází procesu modelování (ve smyslu tvorby modelu, modeling protocol) a to v pořadí, v jakém by tyto fáze měly probíhat. Dle (Anderson, Woessner 1992).

1. Definice cíle, účelu – tento krok determinuje které řídicí rovnice budou použity a jaký softwarový produkt bude použit.
2. Tvorba konceptuálního modelu (conceptual model) – tvorba zjednodušeného schematizovaného modelu reality. Na příkladu hydrologických modelů je možno rozdělit systém povodí do jednotlivých subsystémů (např. řešení odtokové ztráty,

proudění vody po povrchu, proudění vody v korytech, podpovrchový odtok, tání sněhu apod.)

3. Výběr řídicích rovnic a programového kódu (Code verification) vychází z definovaného cíle.
4. Stavba modelu (design) – transformace konceptuálního modelu do formátu použitelného pro vybraný kód. Zahrnuje také definování rozměrů dílčích povodí, časového kroku a použitých výpočetních metod.
5. Kalibrace – zadávání parametrů pro dílčí jednotky účastníci se modelování.
6. Analýza citlivosti kalibrace – zjišťování míry neurčitosti (nejistoty) kalibrace.
7. Verifikace – kontrola výsledků modelování na jiné datové sadě.
8. Predikce – výpočet odezvy systému na budoucí události. Model je spuštěn dle kalibrovaných parametrů (mimo ty, jejichž změnu zjišťujeme). Je nutno znát odhady budoucích vstupních hodnot.
9. Analýza citlivosti predikce – testování výsledků predikce ve srovnání se změnami vstupních hodnot.
10. Prezentace model designu a výsledků.
11. Postaudit (posouzení) - hodnocení modelu praxí a časem.
12. Případná změna stavby modelu (redesign).

5.5 Matematické modely v hydrologii

V této klasifikaci je uvedeno další rozdělení skupiny matematických modelů používaných v hydrologii, přičemž jsou uvažovány pouze modely dynamické, což se odráží např. v posunu při dělení dle počtu dimenzí. Čtvrtá dimenze – čas – je uvažována automaticky. Dle (Unucka 2006).

5.5.1 Základní dělení

a) Dle počtu dimenzí (X, Y, Z):

- 1D – ustálené/neustálené proudění v korytech toků (HEC - RAS, MIKE 11, HYDROG)
- 2D – povrchový odtok (HEC-HMS, MIKE, HYDROG)
- 3D – podzemní odtok v nasycené zóně (MIKE, MODFLOW, WMS ad.)

Neméně důležitým aspektem při výběru či návrhu modelu je i počet dimenzí modelované domény. Principiálně vyjdeme z předpokladu, že v deterministických modelech jsou proměnné a parametry funkcemi nezávislých proměnných prostoru a času. V souladu s konvencí jsou označovány x,y,z a t. V závislosti na počtu dimenzí potom modely dělíme na:

- 0D – modely bez prostorové závislosti, pouze časový atribut (často tímto typem modelu bývají ekologické populační modely)
- 1D – modely zahrnují pouze jeden prostorový atribut. Častým typem těchto modelů bývají v hydrologii hydrodynamické modely (MIKE 11, HEC-RAS), které řeší změny hladin pouze v hlavním směru pohybu vodního kontinua (např. v korytech dolů po toku). Někdy do této skupiny patří i modely

pro nenasycenou zónu, kdy je např. infiltrace řešena vertikálním směrem v rámci půdního profilu (HYDRUS 1D, WHI UnSat Suite apod.)

- 2D – modely obsahují 2 prostorové proměnné a bývají někdy rozlišovány na vertikální a horizontální. V hydrologii se může jednat o modely řešící svahový odtok (HEC-HMS, TOPMODEL, SIMWE) nebo 2D proudění v korytech (MIKE 21c). Obecně tímto typem modelu bývají i populační ekologické modely s prostorovým aspektem nebo modely řešící šíření znečištění v atmosféře z bodových zdrojů.
- 3D – jedná se o nejkompexnější modely s 3 prostorovými proměnnými. Díky náročnosti na parametrizaci a výpočet se v hydrologii více rozšiřují teprve v poslední době. V hydrogeologii jsou nejznámějšími příklady MODFLOW a FEFLOW, v hydrologii pak GSSHA a MIKE SHE. V meteorologii a klimatologii jsou to pak numerické předpovědní modely typu ALADIN, GFS, MM5 nebo tzv. globální cirkulační modely (GCM) používané k simulaci změn klimatu a přírodního prostředí v geologické historii Země (GISS, CCCM, GFD ad.).

Někdy se můžeme v literatuře setkat např. s termínem 2,5D model, což značí nejčastěji parametrizaci třetí dimenze modelu. Model je tedy schopen produkovat výsledky ve třech dimenzích, ale jednu z dimenzí numericky neřeší.

b) Dle míry abstrakce jednotlivých prvků modelu:

- Celistvé sdružené (lumped models) jsou založeny na ignoranci nebo průměrování hodnot variace vlastností prvků v prostoru, jsou založené empiricky. (UHM atd.) Celá modelovaná doména (např. povodí) je považována za kvazihomogenní celek.
- Semidistribuované (semidistributed models). V semidistribuovaných modelech jsou parametry primárně přiřazovány prostorovým jednotkám (např. dílčím povodím), definovaným na základě objektivně stanovených fyzickogeografických kritérií.
- Distribuované (distributed models). V distribuovaných modelech je simulovaná doména diskretizována do bloků (reprezentativní elementární objem, REV) nebo elementů, kterým jsou přiřazovány hydrologické a hydraulické parametry (platné pro celý blok či element), jež mohou být reálně pozorovány a měřeny nebo odhadnuty.

c) Dle podstaty řešení:

- fyzikálně podložené (modely tání sněhu, evapotranspirace apod.),
- aproximace (např. hydraulická aproximace pomocí diferenciálních rovnic - Saint Venant, Runge-Kutt schéma, Preissmanovo 4 bodové schéma apod.).

5.5.2 Rozšiřující dělení

d) Dle způsob zpracování vstupních informací:

- empirické – vyznačují se jednoznačně přiřazenými příčinami a jejich následky a snahou o jejich explicitní vyjádření v průběhu modelovacího procesu (např. transformace v nádržích, Chézyho vztah),

- konceptuální – znalost obecných zákonitostí, vztahů a popř. přibližných hodnot (např. Snyderův UH, kinematická vlnová aproximace).

e) Dle charakteru procesu (určitost / náhodnosti):

- Deterministické – ve vstupních datech nejsou zohledněny prvky náhodnosti, zanedbává prostorová závislost veličin a uvažuje se pouze časová závislost, je možné vyjádřit diferenční rovnicí:

$$f[x_t, y_t, x_{t-1}, y_{t-1}, x_{t-2}, y_{t-2}, \dots, s_1, s_2, \dots] + e_t = 0$$

Deterministický model předpokládá, že systém nebo proces funguje tak, že daná série událostí vede k jednoznačně definovatelnému výsledku. Řídící rovnice přesně definují vztahy příčina-důsledek, zásah-odezva.

- Stochastické – vyznačují se absencí vazebnosti mezi příčinou a následkem hydrologického jevu, fuzzy modelování atd. (pravděpodobností modely a modely pro generování časových řad) stochastický model předpokládá, že systém funguje tak, že faktory přispívající k výstupu jsou nejisté. Tyto modely počítají, v rámci požadované úrovně spolehlivosti, pravděpodobnost výskytu dané hodnoty v určitém bodě.

Většina dostupných modelů jsou modely deterministické. Avšak heterogenita přírodního prostředí, zvláště pak variabilita takových parametrů jako je např. hydraulická vodivost, pórovitost a další fyzikální parametry nenasycené zóny nebo parametry terénu či krajinného pokryvu (angl. land cover) zásadním způsobem ovlivňuje spolehlivost matematických modelů v hydrologii (Smith, 1995). Tato heterogenita způsobuje hlavní problémy v aplikaci fyzikálně založených deterministických modelů, byť detailnější prostorová distribuce modelu tento problém v uspokojivé míře řeší. (Unucka 2010)

5.5.3 Metody řešení

Řídící rovnice jak deterministických, tak stochastických modelů mohou být řešeny buď analyticky nebo numericky. (dle Unucka 2010)

Analytické modely dávají exaktní uzavřené řešení parciální diferenciální rovnice spojitě v prostoru a čase. Poskytují přesné řešení, odvozené na základě mnoha zjednodušujících předpokladů týkajících se hydrologického systému, jeho geometrie a vnějších hydraulických vlivů.

Semianalytické modely využívají numerických technik pro aproximaci komplexních analytických řešení, umožňují diskrétní řešení buď v čase nebo prostoru.

Numerické modely představují nejkomplexnější prostředek pro kvantitativní analýzu hydrologických problémů. Numerické modely jsou mnohem méně zatížené zjednodušujícími předpoklady používanými v analytických modelech, a proto jsou vhodné pro řešení komplikovanějších problémů ve složitějších podmínkách. Nevýhodou je, že vyžadují značně rozsáhlejší vstupní data a jejich řešením je numerická aproximace. Předpoklad homogenity a izotropie prostředí není nutný, neboť v modelu jsou zadávány uzlové (tzv. nodální) hodnoty hydraulických parametrů. Flexibilitu značně zvyšuje i možnost zadání komplexních okrajových podmínek. Numerické metody jsou založeny na aproximaci kontinuálních (definovaných v každém libovolném bodě) parciálních diferenciálních rovnic soustavou diskrétních rovnic v čase a prostoru. Obdobně je diskretizována zájmová oblast (povodí) a čas, kdy každý subregion (element, blok, subpovodí) a časový krok je popsán algebraickou rovnicí nebo soustavou rovnic.

To znamená, že numerické metody vyžadují návrh gridu (sítě) a časových kroků. Grid vzájemně propojených uzlů, ve kterých musí být specifikovány vstupní parametry, vytváří základ pro matici rovnic, které mají být řešeny. Návrh gridu je nejkritičtější krokem ovlivňujícím přesnost vypočtených výsledků (van der Heijde et al, 1988). Návrh gridu závisí na výběru numerické metody. V modelování hydrologických procesů jsou používány zejména následující numerické metody: (Unucka 2010)

- metoda konečných rozdílů,
- metoda konečných prvků,
- integrální metoda konečných rozdílů,
- metoda hraničních prvků.

5.5.4 Praktické přístupy k rozdělení modelů v hydrologii

Při praktickém modelování hydrologických procesů je možno dle typu modelovaného procesu vyčlenit 2 základní skupiny modelů podle simulované části hydrologického cyklu:

a) srážkoodtokové (s-o) modely

Tato skupina modelů provádí simulaci transformace srážky na odtok metodami hydrologické a hydraulické transformace.

b) hydrodynamické (HD) modely

Zde dochází k simulaci postupu a transformace vlny vyvolané zkoumanou srážkou v korytech a jejich inundačních oblastech (případně vodních nádržích).

Z pohledu prostorové složky se modely nejčastěji dělí dle typu schematizace povodí na:

- celistvé modely (lumped),
- semidistribuované modely (semi distributed),
- distribuované modely (distributed) (podrobněji řešeno v kap. 5.5.1.).

Semidistribuovaný model je nejpoužívanějším typem modelu z důvodu kompromisního řešení mezi distribuovanými a celistvými modely. Celistvé modely příliš generalizují údaje o krajinné sféře (do jedné průměrné hodnoty) a jejich použití je proto omezeno na specifické úlohy. Distribuované modely přesněji popisují povodí, avšak jejich masivnímu nasazení brání nejen časová náročnost výpočtu pro větší povodí, ale hlavně požadovaná přesnost datových vstupů, která je u existujících geodat většinou nižší než podrobnost dělení povodí do rastru. Z těchto důvodů je vhodnější použití semidistribuovaného modelu, který rozděluje povodí do dílčích částí (subpovodí), jež tvoří relativně homogenní jednotky a jednotlivé parametry krajinné sféry i srážková data jsou v nich zastoupena jednou hodnotou reprezentující celé subpovodí. Další výhodou je možnost rozdělení modelovaného povodí do tolika subpovodí, aby míra detailnosti odpovídala vstupním geodatům a nedocházelo k jejich přílišné generalizaci.

Další dělení hydrologických modelů je v zásadě možné, ale není u modelovacích softwarových systémů vhodné. Vzhledem k tomu že se jedná o matematické modely, je na ně možno aplikovat výše zmíněnou systemizaci, avšak je v podstatě nemožné zařadit celý modelovací software do těchto kategorií, jelikož většinou obsahuje velké množství metod řešících jednotlivé fáze hydrologické a hydraulické transformace. Je možné zařadit pouze konkrétní metodu, která může být použita ve více modelovacích softwarech. Příklad

rozdělení jednotlivých metod použitých v modelovacím software HEC-HMS (Schraffengerg, Flemming 2006) je uveden v Tab. 1

Tab. 1. Dělení metod použitých v HEC-HMS. (Feldman 2000)

Modely výpočtu objemu odtoku / odtokové ztráty	
Initial and constant-rate	událostní, celistvý, empirický, odvozované parametry
SCS curve number (CN)	událostní, celistvý, empirický, odvozované parametry
Gridová SCS CN	událostní, distribuovaný, empirický, odvozované parametry
Green and Ampt	událostní, distribuovaný, empirický, odvozované parametry
Deficit and constant rate	kontinuální, celistvý, empirický, odvozované parametry
Soil moisture accounting (SMA)	kontinuální, celistvý, empirický, odvozované parametry
Griddová SMA	kontinuální, distribuovaný, empirický, odvozované parametry
Modely přímého odtoku	
Uživatelé specifikovaný jednotkový hydrogram (UH)	událostní, celistvý, empirický, odvozované parametry
Clarkův UH	událostní, celistvý, empirický, odvozované parametry
Snyderův UH	událostní, celistvý, empirický, odvozované parametry
SCS UH	událostní, celistvý, empirický, odvozované parametry
ModClark	událostní, distribuovaný, empirický, odvozované parametry
Kinematická vlnová aproximace	událostní, celistvý, konceptuální, měřené parametry
Modely podzemního (základního) odtoku	
Constant monthly	událostní, celistvý, empirický, odvozované parametry
Exponential recession	událostní, celistvý, empirický, odvozované parametry
Linear reservoir	událostní, celistvý, empirický, odvozované parametry

Modely hydraulické transformace v korytech	
Kinematická vlnová aproximace	událostní, celistvý, konceptuální, měřené parametry
Lag	celistvý, empirický, odvozované parametry
Modified Puls	událostní, celistvý, empirický, odvozované parametry
Muskingum	událostní, celistvý, empirický, odvozované parametry
Muskingum-Cunge Standard Section	událostní, celistvý, kvazi-konceptuální, měřené parametry
Muskingum-Cunge 8-point Section	událostní, celistvý, kvazi-konceptuální, měřené parametry
Soutok	kontinuální, konceptuální, měřené parametry
Bifurkace	kontinuální, konceptuální, měřené parametry

5.6 Prostorově založené hydrologické modelovací systémy

V oblasti modelování hydrologických procesů dnes existuje celá řada metod rozpracovávajících z různých úhlů pohledu jednotlivé fáze hydrologického cyklu. Tyto metody jsou dále zpracovávány vývojáři do softwarových produktů vhodných pro hydrologické modelování. Takových produktů existuje velké množství, přičemž se odlišují svým zaměřením, vhodností použití v jednotlivých úlohách, použitými metodami, potřebnými vstupními geodaty apod. Jsou-li brány v úvahu pouze hydrologické modely postavené na prostorovém základě, je možno jmenovat např. modelovací systémy uvedené v Tab. 2. Všechny tyto systémy umožňují některým ze způsobů komunikaci s geografickým informačním systémem (viz kap. 5.8.3). Uvedené množství systémů není konečné, další je možno nalézt např. v Singh, Woolhiser (2002).

Tab. 2. Příklady hydrologických modelovacích systémů založených na prostorové bázi a umožňujících propojení s geografickým informačním systémem (upraveno dle Marsik 2008).

Modelovací systém	Informační zdroje	GIS platforma
HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System)	Feldman, 1981, 2000	ArcGIS
PRMS (Precipitation-Runoff Modeling System)	Leavesley et al. 1983	
SHE (Système Hydrologique Européen)	Abbott et al. 1986a, 1986b Bathurst et al. 1995	

MIKE-SHE (Generalized River Modeling Package-SHE)	Refsgaard and Storm 1995	
DHSVM (Distributed Hydrology Soil Vegetation Model)	Wigmosta et al. 1994	
AGNPS (Agricultural Non-Point Source)	Young et al. 1989, 1995	GRASS
ANSWERS (Areal Non-point Source Watershed Environmental Response Simulation)	Beasley et al. 1980 Bouraoui et al. 2002	
SWAT (Soil and Water Assessment Tool)	Arnold et al. 1998	
TOPMODEL (Topography Based Runoff Prediction Model)	Beven 1995 Beven, Kirkby 1976, 1979	
CASC2D (CASCade Two Dimensional (2D) Model)	Julien, Sagharian 1991 Ogden, et al. 2000	
KINEROS (Kinematic Runoff and Erosion Model)	Woolhiser et al. 1990 Smith et al. 1995	
r.water.fea, r.vFlo	Vieux, et al. 1990	

5.7 Vstupní geodata pro hydrologické modelování

S rozvojem použití semi- a distribuovaných hydrologických modelů logicky vzrostla potřeba geodat s požadovanou úrovní rozlišení. Konkrétní úroveň je kompromisem mezi potřebou co nejlepší reprezentace prvků krajinné sféry v modelovaném povodí, velikostí modelovaného povodí a finančními náklady na pořízení geodat. Výsledné prostorové rozlišení je pak limitní pro rozlišení hydrologického modelu aby nedošlo k tzv. krizi dat, tj. aby elementární jednotky modelu neměly menší rozlišení než vstupní geodata.

Pokud pomineme malá experimentální povodí, na kterých je možné získávat geodata přímo terénním měřením s vysokou podrobností, jsou používána geodata již dříve vytvořená, která z geoinformatického hlediska patří do následujících skupin:

a) Referenční geodata

Referenční geodata jsou používána pro tvorbu digitálního modelu terénu modelovaného povodí a pro kontrolu správnosti odvozených odtokových linií. Nejčastěji je v České republice používána ZABAGED nebo DMÚ25.

b) Aplikačně závislá geodata

Jako aplikačně závislá geodata je zde možno označit geodata popisující jednotlivé složky krajinné sféry, ve kterých probíhají modelované fáze odtokového procesu.

Slouží k odvození hydrologických parametrů pro jednotlivé elementární jednotky hydrologického modelu. Jedná se o geodata popisující:

- půdní složku (např. bonitované půdně-ekologické jednotky (BPEJ), lesní typologické mapy, Půdní mapy ČR 1:50 000 a 1:100 000),
- vegetační pokryv (např. CORINE Land Cover).

Z hlediska časové složky je možné rozlišovat dva druhy vstupních dat pro hydrologické modelování (Unucka 2010):

- a) statická data,
- b) dynamická data.

Jako statická data jsou označována ta, u nichž se nepředpokládá a není zaznamenána změna v průběhu stavby a používání modelu, takže není nutno ukládat jejich časovou složku. Jedná se především o výše zmíněná referenční a aplikačně závislá geodata. Dynamická data svým charakterem vykazují kontinuální nebo diskrétní změnu v časovém úseku stavby a používání modelu a je tedy nutné ukládat jejich časovou složku. Jedná se především o data zaznamenávající průběh hydrometeorologických jevů.

Oba typy dat je možné v rámci preprocessingu zpracovat v prostředí GIS do formy vyžadované modelovacími systémy.

Z hlediska využití výše zmíněných dat v průběhu preprocessingu, je možné rozlišit

- a) výšková data,
- b) geodata pro odvození parametrů krajinné sféry,
- c) hydrometeorologická geodata.

Mezi výšková data patří geodata nesoucí informaci o výšce a tvarech terénu. Běžně dostupná jsou tyto reprezentace výškových dat:

- Obecné linie, body a polygony. Do této kategorie je možné zahrnout vektorovou reprezentaci nesoucí libovolnou informaci o tvaru terénu, která může být využita pro popis nebo zpřesnění tvaru terénu. Jedná se především o bodové vyjádření nadmořských výšek (např. geodeticky zaměřená bodová pole, kóty apod.) a o liniová nebo polygonová vyjádření specifických tvarů terénu (např. terénní hrany, přírodní terénní deprese, vodní plochy apod.)
- Izolinie. Tato kategorie zahrnuje specifické liniové vektorové reprezentace jevů – tj. lokalizace míst o identické hodnotě jevu. Nejčastějším zástupcem jsou vrstevnice nebo hloubnice. Zdrojem těchto dat v ČR mohou být výšková data ZABAGED nebo DMÚ25.
- Reprezentace povrchu terénu. Do této kategorie patří geodata přímo popisující povrch terénu v používaných datových modelech:
 - rastrový datový model (např. DMR, DDTED (VGHÚŘ), SRTM)
 - vektorový datový model TIN (např. výškopis z laserscanningu ČÚZK). Diskusi o výhodách i nevýhodách těchto reprezentací je možné nalézt např. v (Vieux 2004) nebo (El-Sheimy et. al 2005).

Do kategorie geodata pro odvození parametrů krajinné sféry patří:

- Geodata nesoucí informace o prostorovém rozložení parametrů půdního pokryvu, v ČR většinou vyjádřená buď v mapách nebo jejich vektorizované podobě, např. v Půdní mapě ČR v měřítkových řadách 1:50 000 a 1:100 000 nebo je možné

je odvodit z kategorií BPEJ pro zemědělskou půdu či z lesních typologických map pro lesní půdu.

- Geodata nesoucí informace o prostorovém rozložení vegetačního krytu (land-cover, LC) nebo využití země (land-use LU). Nejčastějším zástupcem je zde geodatabáze CORINE Land Cover (tj. měřítková řada 1:100 000). Další možností získání tohoto typu dat je interpretace leteckých či družicových snímků nebo využití lesních typologických map, osevních plánů či územně plánovací dokumentace.
- Geodata nesoucí informace o prostorovém rozložení půdních a geologických parametrů (např. Půdní mapa ČR, Geologická, Inženýrskogeologická a Hydrogeologická mapa ČR apod.)

Hydrometeorologická geodata, ačkoliv patří mezi parametry krajinné sféry (popis hydro- a atmosféry) jsou odlišována díky svému dynamickému charakteru, tj. nutnosti zpracování jejich časové složky. Patří sem:

- Měrné stanice s databázemi časových měření meteorologických prvků (výška srážek a sněhové pokrývky, teploty, vlhkost vzduchu atd.) a hydrologických prvků (průtoky).
- Radarové odhady srážek (prostorové rozložení srážek odvozené z měření radarové odrazivosti a ukládané v rastrové podobě – grid).

Výše zmíněná geodata tvoří nejčastěji používanou sadu dat pro hydrologické modelování. Některé aplikace či modelovací systémy mohou vyžadovat specifická data, většinou však spadají do některé z výše uvedených kategorií.

5.8 Použití geoinformačních technologií pro hydrologické modelování

Pokud v tomto pojetí omezíme hydrologické modelování na použití prostorově založených hydrologických modelovacích systémů, je výhodné využít pro zpracování geodat geoinformačních technologií, především DPZ a GIS. Logickým důvodem pro toto využití je práce s prostorovými daty v obou systémech a množství dostupných nástrojů a metod v GIS. (Maidment a Djokic 2000, Vieux 2004, Bedient et al. 2007). Analytické funkce GIS jsou zpravidla členěny do 4 skupin (Unucka et al. 2005):

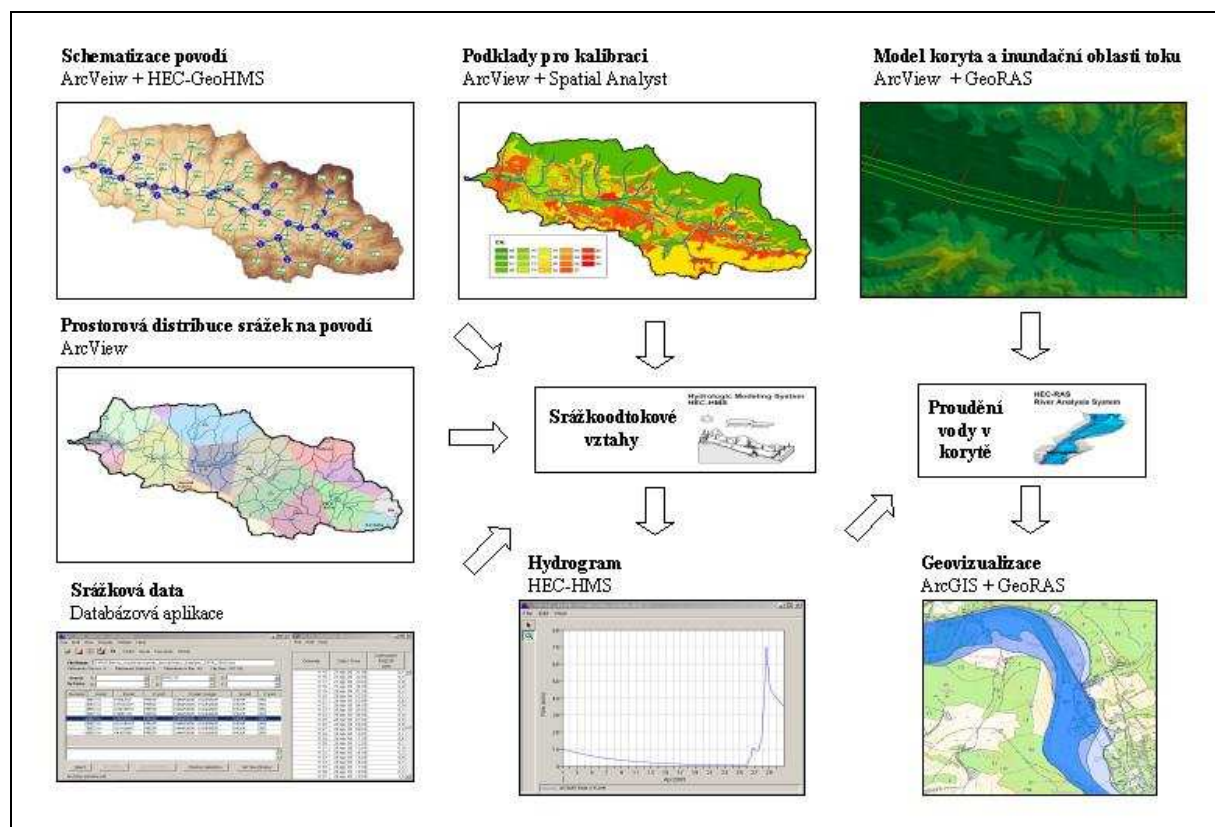
1. údržba a analýzy geometrické složky dat,
2. údržba a analýzy atributové složky dat,
3. integrované analýzy geometrické a atributové složky dat,
4. výstupní formátování dat pro hydrologické modely.

Hlavní přínos GIS spočívá ve schopnosti integrované analýzy prostorových dat, v silných nástrojích automatizovaného zpracování prostorových dat, možnostech analytických operací, modelování a simulací. Rozsah analytických funkcí pro integrované analýzy prostorových dat je značně široký, jedna z možných kategorizací rozlišuje (Horák 1996 in Unucka, et al. 2005):

1. klasifikační operace,
2. překryvné operace,
3. analýzy okolí,
4. analýzy spojitosti.

Využití těchto skupin analytických funkcí v hydrologickém modelování je možno rozdělit do tří procesů:

- preprocessing - příprava vstupních geodat pro modelování,
- postprocessing - zpracování výsledků modelování a následné analýzy,
- propojení GIS a hydrologických modelů (dle Maidment 1993, Maidment et al. 2000).



Obr. 11. Schéma využití GIS v procesu hydrologického modelování.

5.8.1 Preprocessing

Preprocessingem je v hydrologickém modelování míněno zjištění hydrografických charakteristik odtokových linií a povodí na základě analýz DMT a dalších vrstev s údaji o krajině sféře a řešení prostorového rozložení srážek na studovaném území. Výsledky těchto analýz slouží pro stavbu srážkoodtokového modelu a konstrukci detailního modelu říčního koryta s inundační oblastí pro hydraulické modelování pohybu vody v korytě.

a) Schematizace povodí

Schematizace povodí pro srážkoodtokové modelování je posloupnost dílčích analýz DMT, tj. definování povodí pro zvolený závěrový profil, jeho rozdělení do dílčích odtokových linií a příslušných subpovodí a následné převedení do schematizované podoby pro srážkoodtokový model v podobě celistvého, semidistribuovaného nebo distribuovaného modelu. Výsledkem je prostorová distribuce povodí do elementárních jednotek v podrobnosti zvolené operátorem.

b) Odvození parametrů pro stavbu modelu

Další oblastí využití GIS je výpočet hydrografických parametrů dílčích povodí a toků potřebných ke kalibraci srážkoodtokového modelu daného povodí. Tyto charakteristiky je možno rozdělit do dvou kategorií:

1. Charakteristiky zjištěné analýzami povrchu (z digitálního modelu terénu).
2. Charakteristiky odvozené z aplikačně závislých geodat.

Ad 1) Pro jednotlivá dílčí povodí lze odvodit následující používané charakteristiky vypočtené z digitálního modelu terénu:

- plochu povodí,
- obvod povodí,
- průměrnou nadmořskou výšku,
- průměrný sklon,
- největší délku odtokové linie,
- průměrný sklon povodí podél nejdelší odtokové linie,
- průměrný sklon povodí podél odtokové linie od centroidu povodí k závěrovému profilu povodí.

Pro odtokové linie lze odvodit:

- délku odtokové linie,
- sklon odtokové linie,
- délku odtokové linie od centroidu povodí k závěrovému profilu povodí.

Ad 2) Mezi charakteristiky odvozené z aplikačně závislých geodat lze zařadit:

- Parametry vegetačního pokryvu a hydrologických vlastností půd pro řešení výšky odtokové ztráty,
- počáteční ztrátu odtoku,
- podíl nepropustných ploch v každém z dílčích povodí,
- dobu koncentrace (doba, za kterou částice vody doteče z nejvzdálenějšího místa povodí do závěrového profilu),
- dobu dotoku (čas od vypadnutí příčinné srážky na povodí do okamžiku výskytu kulminace v závěrovém profilu),
- koeficient retence (doba zdržení vody v povodí).

c) Prostorové rozložení srážek na povodí

Další skupinou dat potřebných pro srážkoodtokové modelování, k jejichž zpracování je vhodné použít GIS, jsou srážkové úhrny, konkrétně řešení jejich prostorového rozložení na studované povodí. Je možné se setkat se dvěma způsoby měření srážek:

- bodové měření pomocí srážkoměrných stanic,
- plošné měření pomocí vyhodnocení údajů meteorologického radaru.

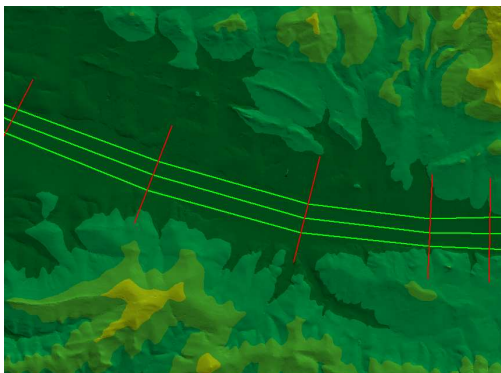
Měření oběma typy metod je nutno před použitím ve srážkoodtokovém modelu zpracovat v GIS - přiřadit hodnoty srážkových úhrnů jednotlivým subpovodím.

Při zpracování údajů ze srážkoměrných stanic dochází k přiřazení všech dílčích povodí k jednotlivým stanicím nejčastěji dle příslušnosti největší části plochy povodí k Thiessenovu polygonu pro danou srážkoměrnou stanicí.

Při zpracování kombinovaných radarových odhadů srážek (radarové odhady adjustované k měření srážkoměrných stanic) dochází k výpočtu průměrné srážky spadlé na dané dílčí povodí z gridových radarových odhadů (z gridu o velikosti buňky 1x1 km nebo 9x9 km) nebo k výpočtu a přiřazení této hodnoty Thiessenovu polygonu příslušné srážkoměrné stanice.

d) Model koryta a inundační oblasti

Součástí hydrologického modelování je i zpracování výsledků srážkoodtokového modelování v hydraulickém modelu pohybu vody v korytě toku a v inundační oblasti. V oblasti preprocessingu je možno využít GIS při stavbě detailního modelu koryta se kterým následně pracuje hydraulický model (např. HEC-RAS). Na rozdíl od definice povodí a odtokových linií se zde pracuje s datovým modelem TIN, jelikož umožňuje přesnější vykreslení podrobností DMT. Koryto a přilehlá oblast se modeluje pomocí řady příčných profilů s definovanými body pro břehy a proudnici toku.



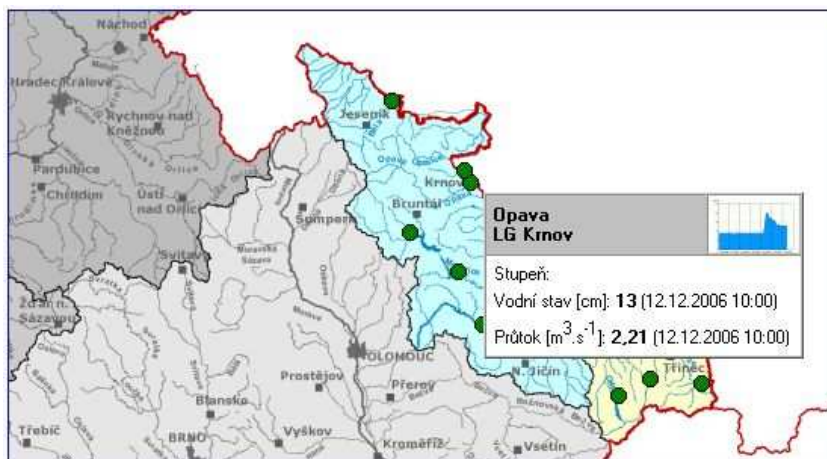
Obr. 12. Stavba modelu koryta a inundační oblasti v ArcView (břehy, proudnice a příčné profily nad digitálním modelem terénu v datovém modelu TIN).

5.8.2 Postprocessing

Postprocessingem je v hydrologickém modelování míněno zpracování výsledků hydrologického modelování a způsob jejich následné vizualizace.

a) Vizualizace výsledků srážkoodtokového modelování

Výsledkem srážkoodtokového modelování jsou hydrogramy (průběh průtoků v čase) pro každý závěrový profil dílčího subpovodí, případně objemy odtoku (odtokové výšky) pro dílčí subpovodí. Vizualizovat je možno např. použitím metody lokalizovaných grafů (Kaňok 1999), pro každý jednotlivý závěrový profil se sestojí hydrogram v podobě čárového nebo sloupcového grafu. Dalším možným způsobem je prostorové znázornění odtokových výšek případně dalších parametrů subpovodí pomocí nepravých kartogramů či jiných kartografických metod (např. přílohy 15 až 31).



Obr. 13. Příklad možné vizualizace aktuálního hydrogramu, vodního stavu a průtoku k danému závěrovému profilu. (MZE 2006)

b) Rozsah inundace a hloubka vody v inundačním pásmu

Při určování rozsahu inundace a hloubky vody v korytě toku či inundační oblasti se vychází z výsledku hydraulického modelu, což jsou vypočtené nadmořské výšky hladiny vody v jednotlivých příčných profilech detailního modelu koryta. Tyto výšky jsou pomocí funkcí GIS mezi profily interpolovány do rastru nadmořských výšek hladiny v záplavové oblasti. Srovnáním s digitálním modelem terénu vzniká rastr hloubky vody v inundačním pásmu.

Dále je možno provádět prostorové dotazy na ohrožené objekty, případně definovat míru záplavového rizika či ohrožení.

d) Vizualizace výsledků hydraulického modelování

Jednou z funkcí geografického informačního systému je možnost vizualizace výsledků, v tomto případě hydraulického modelování. Tato operace předpokládá zpracování výsledků z hydraulického modelu dle bodu a), získaný rastr hloubky vody v inundačním pásmu je možné vizualizovat statickou či dynamickou mapou inundační oblasti nebo izometrickou metodou.



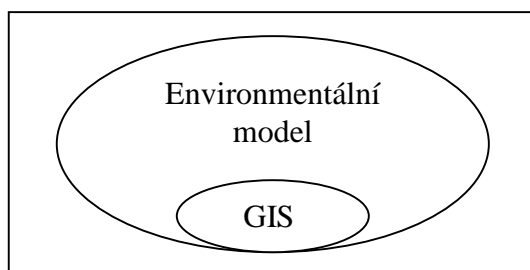
Obr. 14. Příklad vizualizace - mapa hloubek záplavy s 50% průhledností a s ortofotomapou na pozadí, publikovaná pomocí mapového serveru. (Atlas ŽP 2006)

5.8.3 Propojení hydrologických modelů a GIS

Vzhledem k množství parametrů zajišťovaných geoinformačními technologiemi je logickou snahou přímé propojení těchto technologií se softwarovými produkty pro hydrologické modelování tak, aby nebylo nutno získané údaje převádět pomocí operátora. Existuje několik přístupů řešení vazby mezi GIS a hydrologickými modely (environmentálními modely obecně). Pomineme-li izolované modely, které nemají žádnou vazbu na GIS, mohou být tyto vazby tříděny do 4 základních kategorií. (Upraveno dle Fedra 1996, Nyerges 1993, Pequet 1999 a Raper 1993)

Nástroje GIS implementované do modelu

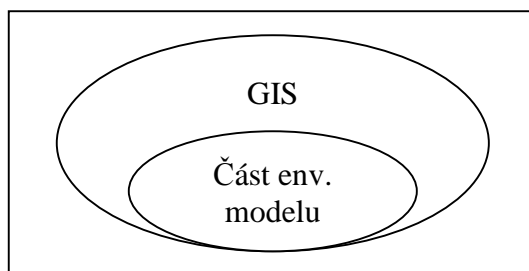
V tomto případě se jedná o přístup, kdy některé nástroje pro zpracování geodat potřebných ke stavbě modelu a pro vizualizaci výsledků byly implementovány přímo do programového prostředí daného modelu. V tomto schématu je GIS chápán pouze jako prostředek pro zpracování mapových podkladů a výstupů a není podstatný pro samotné modelování.



Obr. 15. Nástroje GIS implementované do environmentálního modelu (Embedded GIS in Model).

Funkce modelu vložené do GIS

V tomto přístupu je několik funkcí modelu vloženo do prostředí GIS většinou modulárně, jako např. extenze v ArcGIS nebo rastrové knihovny v GRASS, přičemž je možné použít jen ty funkce, které nejsou omezeny problematickým zpracováním časové složky v GIS.



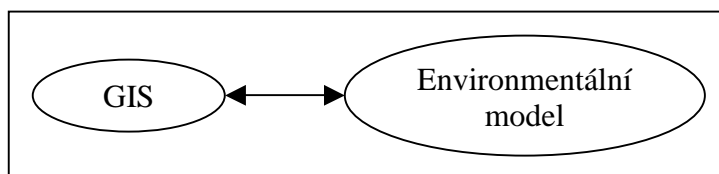
Obr. 16. Vybrané funkce environmentálního modelování vložené do GIS (Embedded Model in GIS).

Příkladem takového propojení může být AVSWAT - tento freewarový modelovací software (Soil and Water Assessment Tool) je vyvíjený americkou Agricultural Research Service (ARS) a Environmental Protection Agency (EPA) a slouží spíše k celkovému hodnocení krajinného potenciálu ve vztahu k odtokovým poměrům, půdní erozi, transportu sedimentů a geoekologickým charakteristikám (insolace, tepelná bilance ekosystému,

dostupnost živin a vláh v půdě apod.). Svým zaměřením se přibližuje ke konceptu nástroje pro zhodnocení a managementu zásahu do krajiny, tedy nástroji krajinné ekologie. Disponuje nástroji pro automatickou schematizaci povodí, správu databází charakteristik povodí (půdní komplexy, land use) či časových řad hydrometeorologických a fenologických dat. AVSWAT je ArcView rozhraní pro základní model SWAT. Původní verze AVSWAT je vložena do prostředí ArcView 3.2 jako extenze vyvinutá v Avenue. Je závislá na extenzi Spatial Analyst a prostředí Dialog Designer. Má definované GUI rozhraní, které slouží jako pre- a postprocesor samotného modelu. (Novější verze využívají ArcGIS 8.x a 9.x či GRASS.) Model je schopen pracovat pouze ve velkých časových úsecích (long-term) a není vhodný pro operativní modelování krátkodobých srážkových epizod. Jedná se v podstatě o nástroj pro posuzování zásahů do land use.

Komunikace prostřednictvím exportních formátů

Tento přístup využívá komunikace mezi standardním GIS a modelovacím systémem pomocí výměnných datových formátů. Tyto formáty byly původně vyvinuty pro vzájemnou komunikaci jednotlivých modelovacích systémů a jsou založeny na ASCII nebo binárním formátu, se kterými GIS běžně pracuje, přičemž každý systém nahlíží na tato data ze svého pohledu. Exportní formáty jsou v současné době standardní součástí modelů a do GIS systému je nutno dodat odpovídající rozšíření pro jejich čtení (většinou dostupné u výrobce modelu). Tento přístup je v současné době široce podporován a většinou bez problémů funguje.



Obr. 17. Komunikace GIS a modelu pomocí exportního formátu (Loose coupling).

Příkladem takového propojení může být dvojice modelů HEC-HMS / HEC-RAS.

Tyto produkty HEC (Hydrologic Engineering Centre) americké armády byly vyvíjeny nejdříve pro potřeby krizového řízení v souvislosti s vodohospodářskou a železniční problematikou, posléze uvolněny jako freeware pro akademickou i operativní obec.

HEC-HMS (Hydrologic Modeling System) je software pro řešení srážkovodtokových vztahů na povodí. Pracuje se srážkovou epizodou reprezentovanou časovou řadou úhrnů ve zvoleném časovém kroku, jejíž načtení je možné přes rozhraní přímo z databáze a zpracovává její transformaci na dílčích povodích a v korytě. (Feldman 2000)

HEC-GeoHMS (Flemming, Doan, 2009) je extenze pro ArcView či ArcGIS, která umožňuje zpracování všech druhů modelů (lumped/sdružených, semidistribovaných, distribuovaných) z digitálního modelu terénu s výpočtem charakteristik povodí a jeho export do HEC-HMS čímž podstatně zjednodušuje stavbu modelu.

Software má přehledné grafické uživatelské rozhraní, ovládání je rovněž poměrně praktické, byť klade vysoké nároky na znalosti uživatele v oblasti hydrauliky a hydrologie. Jeho zřejmě největší výhodou je také řešení srážkovodtokových vztahů paletou metodik, z nichž si může uživatel vybrat pro jeho potřeby nejvýhodnější.

HEC-RAS (River Analysis System) je systém pro hydraulické modelování pohybu vody v korytě, který slouží k analýze úseků vodních koryt a antropogenních objektů situovaných přímo v korytech nebo v hydraulickém kontinuu kolem nich (inundace, ochranné hráze).

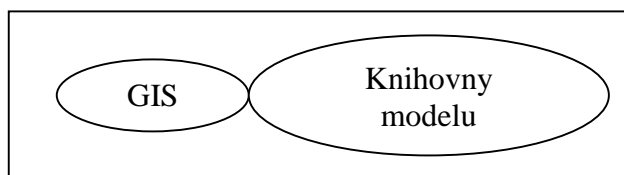
Kromě samotného rozhraní pro modelovací procesy nabízí systém GUI pro import a export dat, úpravu parametrů koryt, vstupních hydrologických dat, hydraulických a geometrických parametrů území (koryta, inundace, objekty). Model je schopen kontinuálně modelovat ustálené a neustálené proudění v jednodimenzionální soustavě.

HEC GeoRAS (Cameron, Ackerman 2005) je extenze pro ArcView nebo ArcGIS, která slouží jako pre- a postprocesor pro HEC-RAS. Umožňuje připravit schéma říčního úseku a inundací, stanovit jejich parametry a vygenerovat exportní soubory pro HEC-RAS. Jako postprocesor pak slouží zejména k vizualizaci záplavových zón z výsledků modelování. (Adamec et al. 2006)

Integrace modelu v prostředí GIS

Tento přístup používá možnosti úprav prostředí pro stavbu kompletního systému hydrologického modelování plně uvnitř prostředí GIS. Pro podporu tohoto přístupu je nezbytné mít v tomto prostředí kromě možnosti zásahu do struktury dat také podporu pro přímou práci s časovou složkou dat a možnost jejího uložení. Je nutné mít možnost používat jednotlivé modely přímo v prostředí GIS buď jejich implementací do struktury GIS, nebo používáním jejich knihoven na vyžádání.

- a) Částečná integrace - znamená použití nezměněných samostatných částí modelu, které jsou řízeny z prostředí GIS. Princip spočívá v řízení toku dat, je řešen automatický přenos dat z jedné nezávislé aplikace do další, přičemž případně dochází k potřebné úpravě jejich formátu. Tento přístup je v současném stupni vývoje nevhodnější a je také nejvíce používán.



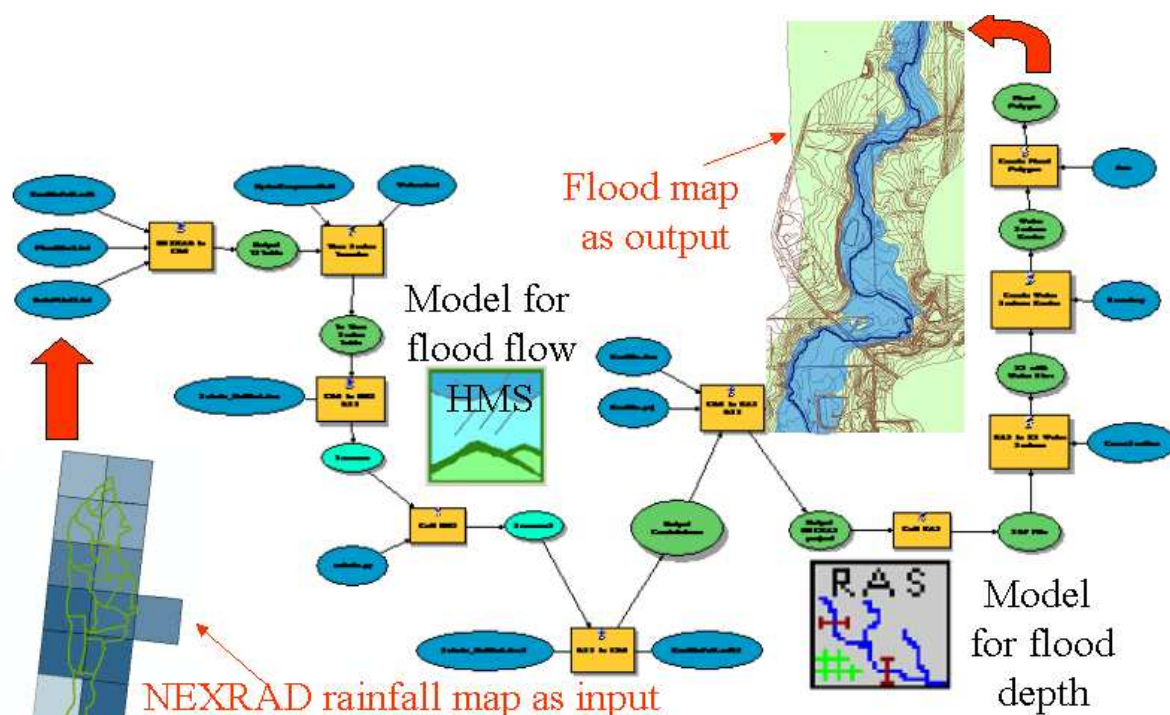
Obr. 18. Částečná integrace modelu do GIS (Tight coupling – partially tight integration).

Příkladem takového propojení může být aplikace Map to Map, které využívá prostředí Model Builder k částečné integraci modelovacího systému HEC-HMS / HEC-RAS do prostředí ArcGIS 9. Cílem je přímá konverze srážkových dat ve formě radarových odhadů systému NEXRAD do záplavových map v prostředí GIS bez nutnosti načítání exportních formátů uživatelem. K práci s časovými řadami srážek v prostředí geodatabáze používá datového modelu ArcHydro (Robbayo 2006, Maidment 2002, Obenour 2003).

Proces je řešen těmito bloky:

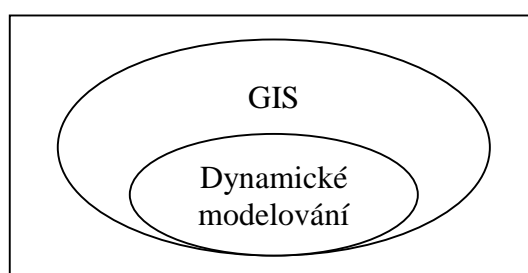
- Načtení časových řad srážek z NEXRAD do datového modelu ArcHydro.
- Úprava formátu časových řad pro načtení do modelu HEC-HMS (přiřazení k subpovodím).
- Načtení časových řad do HEC-DSS (Data Storage System).
- Spuštění HEC-HMS.
- Přesun výsledků (průtoků) do ArcHydro.
- Načtení průtoků do HEC-DSS.
- Spuštění HEC-RAS.
- Uložení výšky vodní hladiny do ArcHydro.
- Výpočet rozsahu a hloubky záplavy (tvorba vrstvy).

Celý proces je řízen z prostředí ArcGIS pomocí Model Builder (Obr. 19).



Obr. 19. Znáznornění procesů a aplikací integrovaných do prostředí AcrGIS 9 pomocí prostředí Model Builder v aplikaci Map to Map. (Robbayo 2006)

- b) Úplná integrace - tento přístup by znamenal přepracování celých modelů pro prostředí GIS. To je v současné době možné pouze u jednoduchých modelů, které nejsou založeny na fyzikálním přístupu řešeným parciálními diferenciálními rovnicemi, jelikož ty je v prostředí GIS problém formulovat a řešit.



Obr. 20. Úplná integrace modelu do GIS (Tight coupling – fully tight integration).

6 CÍL PRÁCE

Cílem práce bylo vytvoření případové studie pro zjištění vlivu úrovně rozlišení vstupních geodat, které je možné použít v České republice při stavbě hydrologických modelů malých povodí, na výsledky hydrologického modelování. V rámci vybraného povodí Lubiny (kap. 7.4) byly zpracovány tyto dílčí úlohy:

1. Vliv použitých výškových dat na výsledky srážkoodtokového modelování.
2. Vliv použitých půdních dat v kombinaci s daty land-use/land-cover na výsledky srážkoodtokového modelování.
3. Zhodnocení možnosti použití zmíněných geodat pro modelování malých povodí a možnosti jejich kalibrace pomocí předchozích vláhových podmínek povodí.

Záměrem práce bylo zjistit, zda úroveň rozlišení geodat, která jsou v ČR běžně dostupná a v praxi používána pro stavbu hydrologických modelů, ovlivňují modelovaný hydrogram v závěrovém profilu povodí do takové míry, aby bylo nutno v případě hydrologického modelování na povodích podobné velikosti a charakteru zvažovat investice do geodat s větším rozlišením, nebo aby bylo nutno pokračovat v testování tohoto ovlivnění ve větším rozsahu.

Srovnání probíhalo mezi geodaty vycházejícími z mapových podkladů s různou úrovní rozlišení geometrické i tématické složky a s různým účelem použití (viz kap. 7.2). Tento postup byl zvažován ve srovnání s možností použití jednoho podrobného podkladu a jeho postupné generalizace. Vzhledem k praktickému zaměření této případové studie bylo rozhodnuto o použití reálných existujících podkladů, které mohou uživatelé při stavbě hydrologických modelů v ČR použít.

Podnět pro výzkum vlivu úrovně rozlišení vstupních geodat vyšel z potřeby zjištění citlivosti hydrologických modelů v případech použití modelů pro studium vlivů změn v krajině na odtok (např. Adamec et al. 2006, Unucka et al 2007). Nedostatečná úroveň rozlišení ve vstupních geodatech v takových případech může vést k nedostatečnému či chybnému popisu složek krajinné sféry studovaného povodí a tím k chování modelu odlišného od reálného povodí. Model vycházející z takových geodat by pak pro tyto účely nebyl vhodný.

Pro operativní praxi (tj. pro použití modelů pro aktuální krátkodobou předpověď průtoků a inundací) je v současné době běžné chybu modelu vzniklou úrovní rozlišení či rozdílným účelem použití vstupních geodat opravit kalibrací modelu na měřený průtok v časovém úseku před predikcí, jelikož v krátkém časovém úseku predikce nedochází k výrazným odchylkám. V případě použití modelu pro studium chování povodí v případě zásahu do složek krajinné sféry však taková kalibrace není vhodná, jelikož zasahuje přímo do parametrů odvozených z vrstev nesoucích informace o těchto složkách a tím degraduje jejich vypovídací schopnost. Proto bylo jako jeden z dílčích úkolů zvoleno srovnání kalibrace založené na předchozích vláhových podmínkách s reálnými průtoky pro jednotlivé datové sady a srážkové epizody.

Výsledkem práce nemůže být zobecnění do jaké míry výše popsané vlastnosti vstupních geodat ovlivňují výsledky modelování, jelikož to by vyžadovalo detailní mapování složek krajiny ve více povodích a testování velkého množství modelů a i poté by byly výsledky platné jen pro podobná povodí. Z výsledků práce by nicméně mělo být zřejmé, zda dochází k takovému ovlivnění, aby řešitelé projektů, pracující s povodími podobné velikosti, mohli kvalifikovaně zhodnotit, je-li pro řešený účel nutné vynakládat prostředky na zpřesnění použitých vstupních geodat.

7 METODIKA ŘEŠENÍ

V metodice řešení případové studie lze rozlišit několik samostatných oblastí:

1. Metody řešení srážkoodtokového modelování.
2. Použitá geodata.
3. Použité geoinformační technologie.
4. Výběr modelového povodí.

Jednotlivé oblasti jsou rozpracovány v samostatných podkapitolách.

7.1 Srážkoodtokové modelování

Srážkoodtokový model reprezentuje (dle Jandora et al., 2006) tzv. srážkoodtokový proces, což je postupná transformace srážky dopadající na povodí až na odtok vody závěrovým profilem povodí. Jedná se o velmi složitý proces, který je ovlivněn řadou činitelů. Především jde o skupinu klimatických činitelů, do které patří vlastní časový a prostorový průběh spadlé příčinné srážky, vlhkost ovzduší, výpar, teplota ovzduší, rychlost a směr větru, atmosférický tlak apod. Tuto skupiny tedy tvoří vedle příčinné srážky hlavně meteorologické veličiny ovlivňující především celkový výpar vody z povodí. Druhou skupinu tvoří geografické činitele povodí, do níž se řadí plocha, střední nadmořská výška, tvar, reliéf, říční síť, hydrogeologické poměry, vegetační pokryv apod. Tato skupina tedy popisuje prostředí, ve kterém se vlastní proces odehrává. Určuje dynamické (přenosové) vlastnosti povodí, které jsou rozhodující pro způsob, jakým se bude časový průběh srážky daného prostorového rozložení transformovat na časový průběh odtoku vody závěrovým profilem.

Vlastní srážkoodtokový proces se skládá ze dvou dílčích transformací. V průběhu první, tzv. *hydrologické transformace*, jsou od srážky dopadající na povodí postupně odečítány hydrologické ztráty. Mezi ně patří kromě ztráty způsobené infiltrací vody do půdy také ztráta výparem, tzv. evapotranspirace (celkový výpar z povrchu vegetačního pokryvu, z pórů rostlin a z půdy), ztráta vlivem intercepce (zdržení vody na povrchu vegetace) a ztráta povrchovou retencí (plošný povrchový odtok nastane až po zaplnění nerovností terénu vodou). Postupnou separací hydrologických ztrát od časového průběhu intenzity srážky se získá efektivní intenzita srážky. Množství vody takto spadlé na povrch terénu pak odtéká z povodí ve formě plošného povrchového odtoku. V této fázi nastává druhá dílčí transformace, tzv. *hydraulická transformace*, při které se plošný povrchový odtok postupně koncentruje v ronových a erozních rýhách a následně v říční síti až na odtok závěrovým profilem.

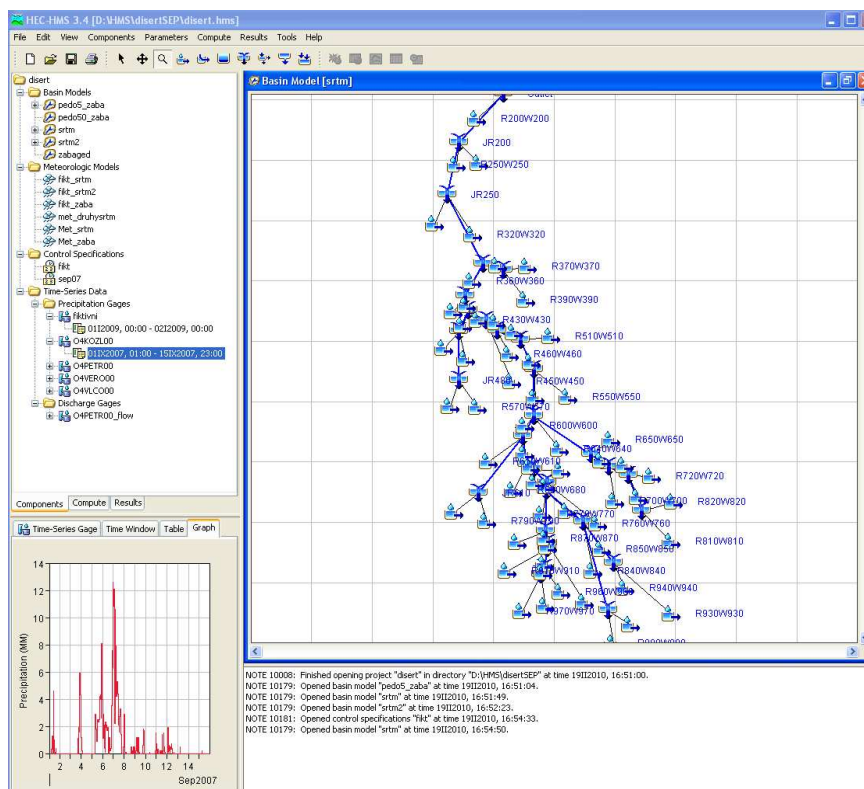
Část celkového odtoku tvoří *podzemní odtok*, tedy voda, jež se dostala do podzemí převážně infiltrací srážky. Z podzemí pak odtéká buď z nenasycené zóny nad hladinou podzemní vody nebo z nasycené zóny pod souvislou hladinou podzemní vody ve formě podzemního odtoku do říční sítě. (Jandora et al. 2006).

Jednotlivé výše popsané části srážkoodtokového procesu je možné pro použití ve srážkoodtokovém modelu odlišit do samostatných komponent a řešit různými metodami (níže).

7.1.1 Použitý modelovací systém

Jako modelovací software byl použit HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center Hydrologic Modeling System). Tento software je součástí balíku software produkovaného The Hydrologic Engineering Center of the US Army Corps of Engineers, v současnosti je program, dostupný ve verzi 3.4. Uživatelské rozhraní je intuitivní a je srovnatelné s jinými prostorově založenými modelovacími systémy (např. MIKE SHE, WMS či ArcGIS). Program je zdarma ke stažení na stránkách <http://www.hec.usace.army.mil>. Výhody tohoto softwaru, které vedly k jeho výběru sou následující:

- disponuje grafickým uživatelským rozhraním,
- má implementovány pokročilé metod pro hydrologickou a hydraulickou transformaci s-o procesu,
- umožňuje výběr metod v rámci jediného projektu,
- řeší správu časových řad (HEC-DSSVue, popř. import z ASCII, MS Excel apod.),
- má k dispozici technickou dokumentaci,
- podporuje extenze pro ArcView s exportním formátem pro preprocessing a postprocessing,
- umožňuje všechny typy schematizace (distribuovanosti) modelu,
- má statut průmyslového standardu v US a je verifikován a validován z aplikací po celém světě,
- je používán na pracovištích v ČR,
- je distribuovaný v licenci freeware,
- má vyřešenou komunikaci s hydrodynamickým modelem pomocí exportního formátu,
- umožňuje poloautomatickou kalibraci modelu.



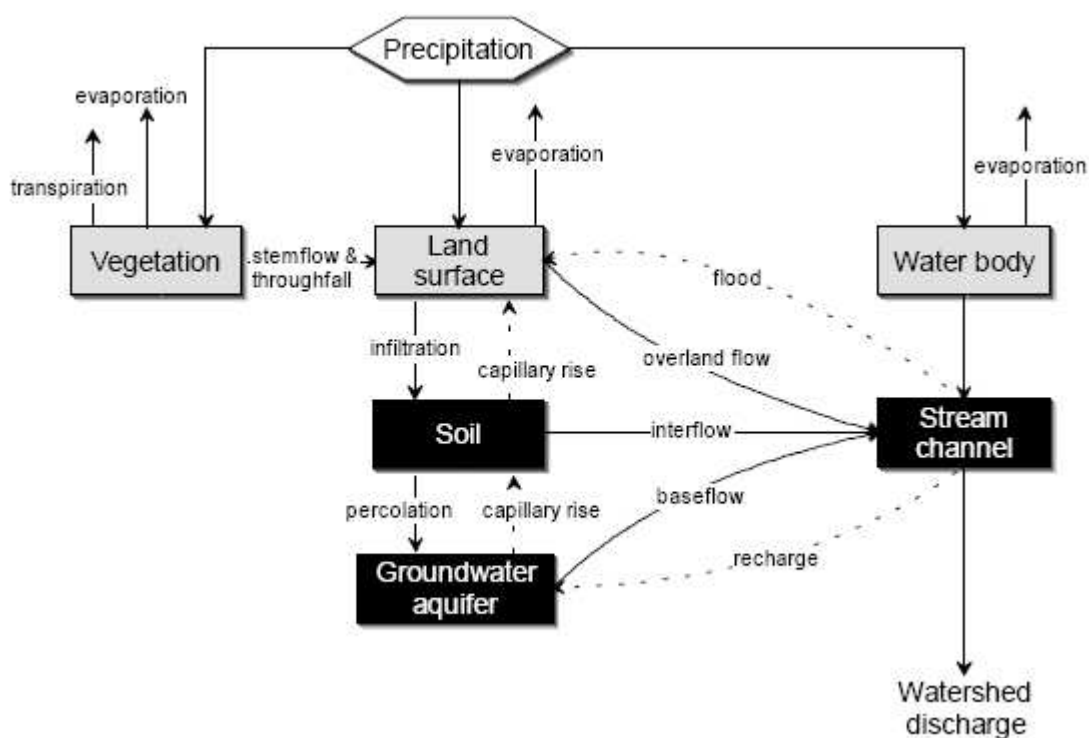
Obr. 21. Uživatelské rozhraní a projekt v HEC-HMS 3.4.

V práci je používán semidistribuovaný typ srážkoodtokového modelu. Tato varianta byla zvolena z těchto důvodů:

- parametry jednotlivých subpovodí reprezentují podmínky příslušné části krajinné sféry a umožňují jejich testování (na rozdíl od modelů typu black-box),
- je méně náročný na výpočetní dobu a kapacitu a na podrobnost vstupních geodat než modely plně distribuované,
- je možné přizpůsobit velikosti jednotlivých subpovodí tak, aby nedošlo ke krizi dat a zároveň ke zbytečné podrobnosti v relativně homogenních oblastech,
- je nejčastěji používán v praxi.

7.1.2 Komponenty řešení srážkoodtokového procesu

V konceptuálním modelu srážkoodtokového procesu je možno vyčlenit jednotlivé komponenty uvedené v Obr. 22.

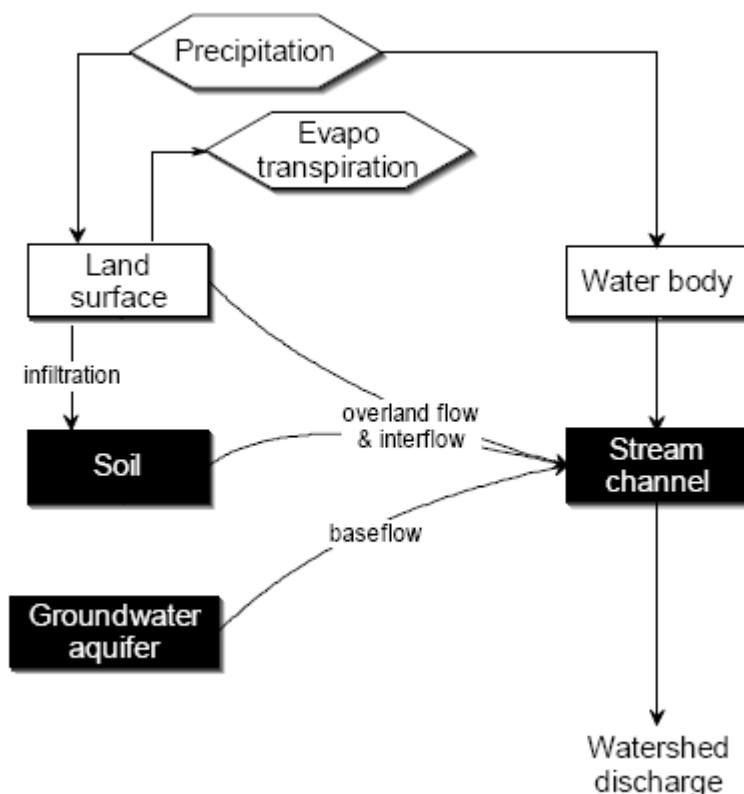


Obr. 22. Konceptuální model srážkoodtokového procesu v lokálním měřítku
Obr. 23. (dle Ward 1975 in Feldman 2000)

Srážkoodtokový modelovací systém HEC-HMS vychází z tohoto konceptu a používá samostatné modely pro řešení jednotlivých komponent odtokového procesu:

1. Model výpočtu objemu odtoku / odtokové ztráty.
2. Model přímého odtoku .
3. Model hydraulické transformace v korytech.
4. Model podzemního (základního) odtoku.
5. Modely hydrologických objektů.

Metody použité pro stavbu srážkoodtokových modelů jsou zmíněny v následujících kapitolách. Konceptuální model řešení srážkoodtokových vztahů v HEC-HMS je zobrazen na Obr. 24.



Obr. 24. Konceptuální model řešení srážkoodtokových vztahů v HEC-HMS (Feldman 2000)

7.1.3 Model výpočtu objemu odtoku / odtokové ztráty

Komponenta výpočtu objemu odtoku určuje, jaké objemy (podíly) dopadlé srážky se transformují na odtok (v podobě povrchového a hypodermického odtoku) a na odtokovou ztrátu.

Pro určení ztráty na povodí a infiltrace je v HEC-HMS možno využít následujících metod:

- konstantní hodnota ztráty (konstantní efektivní srážka během modelované srážkoodtokové epizody),
- exponenciální ztráta (exponenciální křivka efektivní srážky),
- Green-Ampt,
- SCS CN,
- SAC-SMA,
- gridová konstantní (pro distribuovaný model),
- gridová SCS CN (pro distribuovaný model),
- Smith-Parlange (modifikace Richardsovy rovnice).

Pro využití v práci byla použita metoda SCS CN. Tato metoda (Mishra, Singh 2003) byla odvozena na základě analýz jednotkového hydrogramu (dále jen UH) a primárně byla odvozena pro zemědělská povodí. Později byla modifikována pro lesní (standardizovaný nomogram) a urbanizovaná povodí. Mezi nesporné výhody metody lze zařadit možnost rastrové reprezentace hodnot CN pro plně distribuované řešení modelu.

Povrchový odtok je v případě SCS metody odvozován ze vztahu:

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a + S)}, \text{ kde:} \quad [4.1]$$

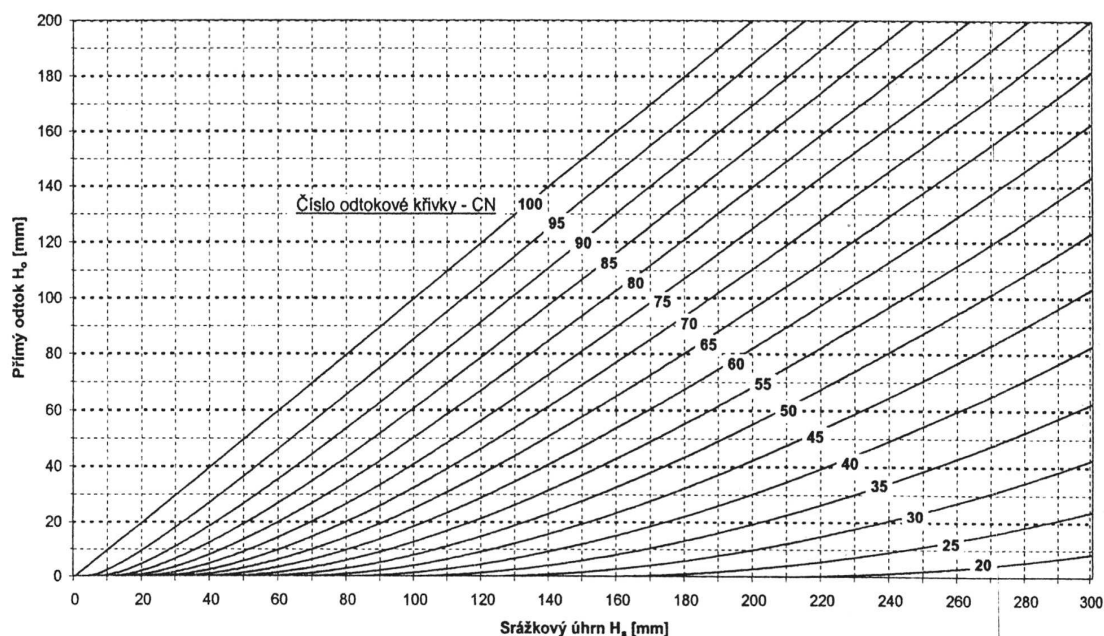
Q povrchový (hortonovský) odtok [mm]

P srážky [mm]

I_a počáteční ztráta na povodí [mm], často lze odhadnout vztahem $I_a = 0.2S$ nebo jiným

S Parametr daný vztahem $S = 25.4 \cdot (1000 / CN - 10)$ [mm]

Základní princip metody je použití křivek závislosti odtoku a příčné srážce, kdy je výsledné číslo křivky odvozeno z hydrologické skupinou půdy (funkce mocnosti půdního profilu a jeho hydraulické vodivosti, používají se 4 kategorie A-D) a LULC (ztráty intercepce a evapotranspirací). Číslo křivky (CN) nabývá hodnot teoreticky 10-100, v našich podmínkách se však hodnoty nižší než 50 vyskytují jen zřídka na elementárních ploškách (rašeliniště apod.). Pro horská povodí typu Bečva, Olše, Bělá apod. čísla CN nabývají hodnot nejčastěji v intervalu (60;75). (Unucka 2010, Hrádek, Kuřík 2004, Janeček 2002)



Obr. 25. Metoda SCS CN (Hrádek, Kuřík 2004)

Pro různé varianty nasycení půdního profilu je začleněn do řešených vztahů parametr AMC (Antecedent Moisture Conditions – AMC), česky předchozí vláhové podmínky. Jedná se o bezrozměrný koeficient upravující základní vztah povrchového odtoku podle úhrnů srážek v předchozích dnech a liší se podle úhrnu i podle čísla CN křivky v řešeném vztahu. Hodnotu AMC lze odvodit podle ukazatele předchozích srážek např. podle Tab. 3

Hydrologickou skupinu půd, která byla primárně navržena pro americkou databázi půd STATSGO, lze odvodit i z map BPEJ (2. a 3. pozice kódu BPEJ) popř. převodem z hodnot půdních druhů a půdních typů (hodnota hydraulické vodivosti).

Tab. 3. Úprava AMC podle UPS (upraveno podle Hrádek, Kuřík 2004)

AMC	UPS za 5 dní [mm]	
	mimovegetační období	vegetační období
I	< 13	< 36
II	13 - 28	36 - 53
III	> 28	> 53

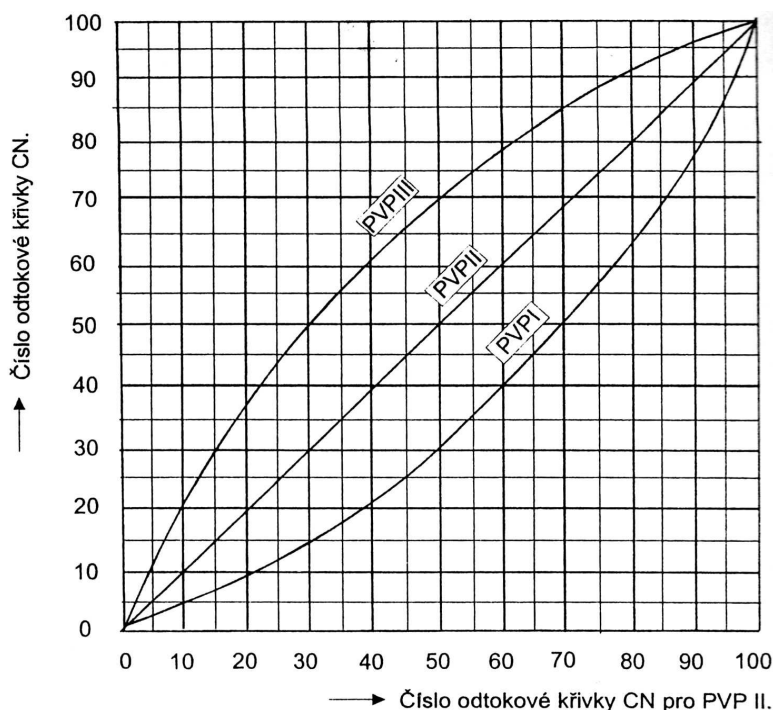
Z Tab. 3 vyplývá, že AMC I charakterizují předchozí vláhové podmínky chudé na srážky s vyšším vysušením půdního profilu, kdežto AMC III pak vyšší nasycení propagující vyšší povrchový (Hortonovský) odtok. CN křivky pro AMC I a II se stanovují přepočtem z původní CN křivky pro AMC II z nomogramu nebo analyticky ze vztahů:

$$CN_I = \frac{CN_{II}}{2.281 - 0.01281CN_{II}} \quad [4.2]$$

$$CN_{III} = \frac{CN_{II}}{0.427 + 0.00573CN_{II}} \quad [4.3]$$

Skupina PVP I charakterizuje nízkou nasycenost aktivní zóny půd v povodí předchozími dešti. Odpovídá suché půdě, ale s takovým obsahem vody v půdě, který ještě umožňuje uspokojivou orbu a obdělávání. Skupina PVP II charakterizuje průměrnou nasycenost aktivní zóny půd v povodí, pro tuto skupinu jsou v Tab. 11 uvedena čísla CN. Vlhkostní podmínky jsou tedy kolem retenční vodní kapacity aktivní zóny. Skupina PVP III charakterizuje vysokou nasycenost aktivní zóny půd v povodí předchozími dešti.

Další možností odvození hodnot CN pro PVP I a PVP III je nomogram uvedený na Obr. 26. (Hrádek, Kuřík 2004, Janeček 2002, Kutílek et al. 2004, Unucka 2010)



Obr. 26. Nomogram pro odvození CN dle předchozích vláhvových podmínek (Hrádek, Kuřík 2004)

7.1.4 Model přímého odtoku

Komponenta přímého odtoku popisuje pohyb vody po povrchu (hortonovský odtok) a půdní (hypodermický) odtok do okamžiku její koncentrace ve vodní tok. V HEC-HMS je možno využít následujících metod:

- uživatelsky specifikovaný jednotkový hydrogram (UH),
- Clarkův jednotkový hydrogram,
- Snyderův jednotkový hydrogram,
- SCS jednotkový hydrogram,
- metoda ModClark,
- kinematická vlnová aproximace.

Pro využití v práci byla použita metoda Clarkova jednotkového hydrogramu. Tato metoda (Sherman 1932) je v rámci semidistribuovaných modelů dobře použitelná pro jejich jednotlivá subpovodí. Největším problémem je zde základní princip uvažování linearitu s-o procesu, která je metodologicky snadno napadnutelná, nicméně z inženýrského hlediska produkce relevantní předpovědi Q v krátkém čase splňuje všechna kritéria (Maidment 1993, Bedient et al. 2007, Hrádek, Kuřík 2002, Unucka 2010).

Princip metody je založen na předpokladu že deště stejné doby trvání a různé intenzity, rovnoměrného časového a prostorového rozložení na povodí vyvolávají hydrogramy o stejných časových základnách nezávisle na úhrnu deště v mm. Platí princip podobnosti (proporcionality) hydrogramů, který lze matematicky vyjádřit vztahem:

$$\frac{Q_{1,t}}{Q_{2,t}} = \frac{W_{1,t}}{W_{2,t}} = \frac{W_1}{W_2}, \text{ kde:} \quad [4.4]$$

$Q_{1,t}, Q_{2,t} \dots$ pořadnice vybraných hydrogramů přímého odtoku (1,2) v čase t
 $W_{1,t}, W_{2,t} \dots$ objemy části hydrogramů za dobu t (po pořadnice hydrogramu $Q_{1,t}, Q_{2,t}$)
 $W_{1,t}, W_{2,t} \dots$ celkové objemy hydrogramů přímého odtoku

Pak dále platí:

$$\frac{Q_t}{Q_{t,UH}} = \frac{W}{W_{UH}} = \frac{i_e * t_d}{H_{O,UH}} = \frac{H_o}{10}, \text{ kde} \quad [4.5]$$

$Q_t \dots$ pořadnice hydrogramu přímého odtoku v čase t

$Q_{t,UH} \dots$ pořadnice jednotkového hydrogramu v čase t

$W \dots$ objem hydrogramu přímého odtoku [m^3]

$W_{UH} \dots$ objem jednotkového hydrogramu [m^3]

$H_o \dots$ celková výška odtoku [mm]

$H_{O,UH} \dots$ jednotková výška odtoku jednotkového hydrogramu [10 mm]

$i_e \dots$ intenzita efektivního (deště vyvolávajícího přímý odtok) deště [např. $mm \cdot min^{-1}$]

$t_d \dots$ doba trvání deště [min]

Dále platí princip superpozice jednotkových hydrogramů, tzn., že dešť libovolné délky trvání odpovídající stejným principům lze transformovat do hydrogramu postupným sčítáním příslušných UH odpovídajícím jednotkovému efektivnímu dešti. Postupným sčítáním UH vzniká S-křivka (Bedient et Huber 2002), která je schopná postihnout dešť o libovolné době trvání t_d . Pro povodí protáhlého tvaru a deště nestejnoměrného časového rozložení lze aplikovat princip konvolučního integrálu UH (Kovář 2000). Tímto spolu s rozdělením povodí na kvazihomogenní elementární subpovodí lze docílit semidistribuovanosti původně celistvé metodě UH. (Bedient, Huber 2002, Maidment, Djokic 2000, Unucka 2010).

Metoda Clarkova UH vychází ze vztahu:

$$S_i = RC * O_i, \text{ kde} \quad [4.6]$$

$S_i \dots$ zásoba na konci periody i

$O_i \dots$ odtok během periody i

$RC \dots$ doba zdržení vody v povodí (angl. Storage Coefficient)

Koeficient RC lze odvodit např. metodou Fort Bend County (rovnice [5.8], [5.9] v kapitole 8.3.7) (Šercl, 2004).

7.1.5 Model hydraulické transformace v korytech

Komponenta hydraulické transformace v korytech popisuje pohyb vody ve vodním toku (routing, channel flow) jako jednodimenzionální tok v otevřeném korytě. V HEC-HMS je možno využít následujících metod:

- kinematická vlnová aproximace,
- Lag,
- modified Puls,
- Muskingum,
- Muskingum-Cunge Standard Section,
- Muskingum-Cunge 8-point Section,
- Confluence (soutok),
- Bifurkace.

Pro využití v práci byla použita metoda kinematické vlnové aproximace, kde je rovnice kontinuity ponechána v diferenciálním tvaru a rovnice hybností je pak rovnicí algebraickou.

Tok vody hranami grafu v semidistribúvaném modelu HMS je řešen vztahem:

$$\frac{\partial A_{i,j}(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial Q_{i,j}(x,t)}{\partial x} = q_{i,j}(x,t) + pz_{i,j}(x,t), \forall h_{i,j} \in H, \text{ kde:} \quad [4.7]$$

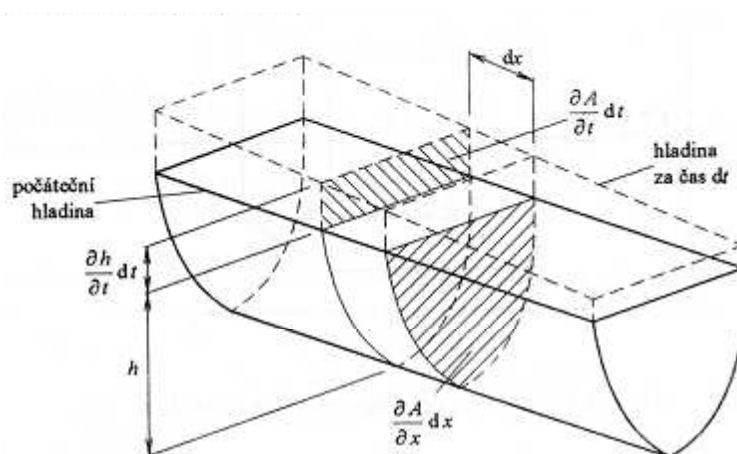
A průtočná plocha

x vzdálenost ve směru toku

t čas

$q_{i,j}(x,t)$ specifický boční přítok (ze srážek, bočních zdrojů, popř. odběrů)

$pz_{i,j}(x,t)$ podzemní přítok, který lze v rámci schematizace vyjádřit zjednodušeně jako odtok z podzemní nádrže sestrojené pro každou plochu samostatně.



Obr. 27. Grafické zobrazení parametrů rovnice kontinuity v 1D (Jandora et al. 2002)

Pak rovnice hybností vztah pro zavěšené plochy lze vyjádřit rovnicí:

$$Q_{k,l}(x,t) = \frac{B_{k,l}(x) * S_{k,l}^{1/2} * y_{k,l}^{5/3}(x,t)}{n}, \forall p_{i,j,s} \in P, \text{ kde:} \quad [4.8]$$

$B_{k,l}(x)$...šířka plochy

$S_{k,l}$ sklon plochy

n Manningův koeficient drsnosti

$y_{k,l}(x,t)$..výška odtoku na ploše

$$Q_{i,j}(x,t) = \frac{A_{i,j}(x,t) * R_{i,j}^{2/3} * S_{i,j}^{1/2}}{n}, \forall h_{i,j} \in H, \text{ kde:} \quad [4.9]$$

$R_{i,j}(x,t)$...hydraulický poloměr [m]

$S_{i,j}$ sklon hrany

$A_{i,j}(x,t)$...průtočná plocha

n Manningův součinitel drsnosti

Kinematickou vlnovou aproximaci lze použít pro řešení, kde pro Froudovo číslo platí $Fr < 2$ a pro součinitel řešení K platí $K < 10$, kde K je vyjádřen:

$$K = \frac{L * S * g}{v^2}, \text{ kde:} \quad [4.10]$$

L c ...délka plochy (úseku)

S sklon plochy (úseku)

g gravitační konstanta

v průměrná rychlost na konci řešeného segmentu (plochy, úseku)

Systém používá při řešení výše uvedených diferenciálních rovnic explicitní diferenční metodu (Bedient, Huber 2002, Beven 2002, Unucka 2010).

7.1.6 Model podzemního (základního) odtoku

Tato komponenta řeší časový průběh množství podzemní vody, která se projevuje v modelovaném hydrogramu. V HEC-HMS je možno využít následujících metod:

- metoda konstantní, měsíční (Constant monthly)
- recesní metoda (Recession)
- lineární rezervoár (linear reservoir)

V práci byla použita recesní metoda, která je založena na reprezentaci základního odtoku z povodí dle (Chow et al. 1988). Ta definuje vztah mezi základním odtokem Q_t v čase t k zadané počáteční hodnotě jako:

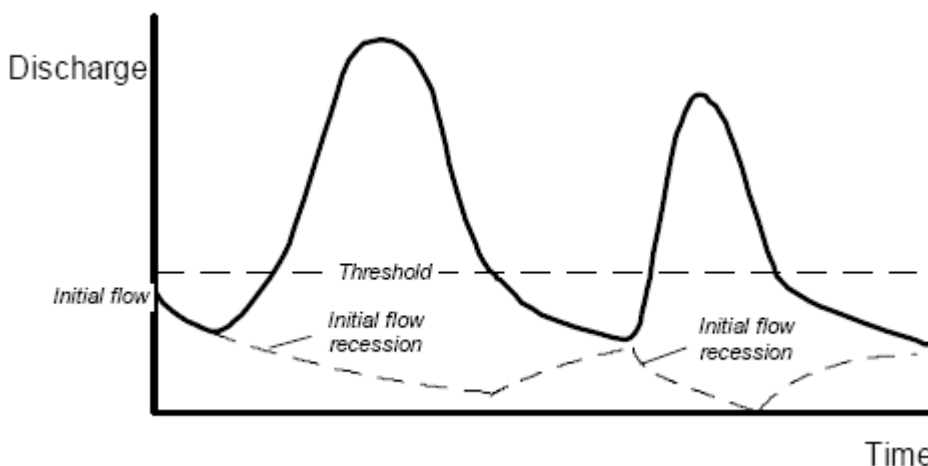
$$Q_t = Q_0 * k^t, \text{ kde:} \quad [4.11]$$

c....počáteční základní odtok v čase 0

k....exponenciální konstanta

V HEC-HMS je konstanta k definovaná jako poměr mezi základním odtokem v čase t a základním odtokem v předchozím dni. Počáteční základní odtok Q_0 je počáteční podmínkou modelu a je specifikována buď jako objem odtoku v $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, nebo specifický odtok v $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^2$.

Model základního odtoku je modifikován v průběhu srážkové epizody, kdy od určitého uživatelem definovaného momentu dochází k navyšování základního odtoku na základě modelovaného přímého odtoku (modelovaného hydrogramu). Daný moment je definován buď konstantní hodnotou průtoku, nebo poměrným číslem vzhledem k průtoku v době kulminace (threshold). Od tohoto okamžiku dochází k navyšování základního odtoku výpočtem pomocí recesní konstanty z modelovaného povrchového odtoku a celkový průtok je modelován pouze recesním modelem základního odtoku do doby, než dojde k překročení definované prahové hodnoty (následnou srážkou). Princip metody je graficky znázorněn na Obr. 28.



Obr. 28. Grafické zobrazení implementace recesní metody odvození základního odtoku v HEC-HMS (Feldman 2000)

7.2 Použitá geodata

V rámci případové studie byly pro použití ve srážkoodtokovém modelu řešeny dvě oblasti dat.

1. Výšková data pro tvorbu DTM.
2. Půdní data a dat land-use/land-cover pro odvození parametrů krajinné sféry.

Pro schematizaci porovnávaných semidistribuovaných srážkoodtokových modelů a pro odvození hydrografických parametrů jednotlivých subpovodí byla použita výšková data ze dvou zdrojů – ZABAGED a SRTM (viz níže). Jejich výrazná odlišnost jak v měřítku, tak ve způsobu získávání nadmořských výšek reprezentuje dostupné krajní

možnosti získání výškových dat. Na jedné straně lokální výšková data v relativně velké přesnosti a podrobnosti a na straně druhé datová sada výškopisu volně dostupná pro celý svět v relativně malé podrobnosti. Ze zmíněných odlišností se očekávaly výsledky umožňující rozhodování o dalším postupu testování citlivosti modelu na tento typ dat. V případě malé odlišnosti v modelování výsledného hydrogramu by bylo možno konstatovat malou citlivost tohoto typu modelu na přesnost výškopisných dat.

Výškopis ZABAGED

Výškopisná složka ZABAGED reprezentuje v podobě liniové vektorové vrstvy vrstevnice státního mapového díla v měřítku 1:10 000. Data jsou dostupná v rozsahu území České republiky a jsou ve výškovém systému Baltském – po vyrovnání, souřadnicový systém S-JTSK. Poskytovatelem dat je Český úřad zeměměřický a katastrální a jde o data dostupná buď zdarma nebo za úplaty (dle účelu a typu příjemce).

Data jsou snadno zpracovatelná do podoby rastrového digitálního výškového modelu (DEM), nutno je pouze zvolit vhodnou interpolační metodu. V tomto případě byla zvolena metoda Topo to Raster, která je implementací metod ANUDEM (Hutchinson, Gallant 2000) v softwarovém produktu ArcGIS 9.3. Její výhodou je zpracování hydrologicky správného DEM zachovávajícího směr odtoku vody po povrchu. Tato metoda je doporučována k použití pro účely srážkoodtokového modelování.

Výšková data SRTM

SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) je sada výškopisných dat pořízených topografickou misí raketoplánu Shuttle metodou radarového skenování povrchu. Data jsou dostupná pro území téměř celého povrchu pevnin (0° – 60° severní a jižní šířky) v rozlišení 1x1“ (cca 30 m na rovníku) pro území USA a 3x3“ pro území ostatního světa v souřadnicovém systému WGS 84 a výškovém systému EGM96 (CGIAR 2009). Pro nekomerční účely jsou dostupná zdarma (NASA 2009). Ve studovaném území je velikost buňky gridu cca 60x90 m. Pro zpracování v softwaru ArcGIS je možné data získat v podobě rastrového DEM v textovém formátu ASCII vhodném pro import do ESRI gridu (CGIAR 2009). Pro porovnání s výškopisem ZABAGED a pro stavbu srážkoodtokového modelu v SI jednotkách bylo nutné provést transformaci do souřadnicového systému S-JTSK, což bylo provedeno pomocí transformace bodového pole vzniklého z gridu DEM a následné interpolace do podoby rastrového DEM metodou Topo to Raster (Hutchinson, Gallant 2000) již v S-JTSK.

Pro odvození parametrů krajinné sféry v použité metodě SCS-CN (parametry CN a počáteční ztráta na povodí) byla použita kombinace následujících geodat.

- a) Geodatabáze nesoucí informace o prostorovém rozložení parametrů půdního pokryvu. Zde byly použity měřítkové řady 1:100 000, 1:5000 a 1:10 000. Měřítkové řady 1:50 000 a 1:100 000 byly zastoupené Půdními mapami ČR, řada 1: 10 000 byla zastoupena kombinací BPEJ pro zemědělskou půdu a lesních typologických map pro lesní půdu.
- b) Geodatabáze nesoucí informace o prostorovém rozložení vegetačního krytu. Pro srovnání byla použita geodatabáze CORINE Land Cover (tj. měřítková řada 1:100 000) a geodatabáze krajinného pokryvu v měřítku 1:5 000 zpracovaná interpretací leteckých snímků.

Problematickou skupinou jsou geodata sloužící pro odvození parametrů půdního pokryvu. Jelikož v České republice neexistují geodata, která by obsahovala přímo pro modelování potřebné informace o texturním složení půd a pokrývala celé území, jsou nahrazována

mapovými podklady, ze kterých je možné tuto informaci nepřímo odvodit (např. z půdních typů Půdní mapy ČR, z hlavní půdní jednotky BPEJ či ze skupiny lesních typů Lesních typologických map). Do testování jsou tedy zahrnuta všechna zmíněná geodata, přestože se neliší pouze úrovní rozlišení, ale také účelem původně zamýšleného použití a způsobem odvození požadované informace. Důvodem pro toto rozhodnutí je fakt, že neexistuje jiná varianta a vždy je nutno některá z těchto geodat pro hydrologické modelování použít. Podobný problém je možné identifikovat i u geodatabáze krajinného pokryvu. Geodatabázi CORINE Land Cover nelze odlišit od účelově založené geodatabáze vzniklé interpretací leteckých snímků jen úrovní rozlišení, nicméně důvodem srovnávání těchto geodat je opět neexistence jiné varianty spolu s relativní snadností tvorby takových geodat (interpretace leteckých / družicových snímků).

7.3 Použité geoinformační technologie

Při zpracování geodat pro stavbu a kalibraci modelu (preprocessing) a následné vyhodnocení a geovizualizaci modelovaných výsledků (postprocessing) bylo využito následujících geoinformačních technologií.

7.3.1 Digitální modely terénu

Ve hydrologickém modelování byly analýzy povrchu DMT použity pro odvození geometrické stavby modelu povodí Lubiny, k rozdělení povodí na dílčí subpovodí, k přiřazení jim odpovídajících úseků vodních toků a k odvození průměrných charakteristik subpovodí a úseků vodních toků odvozených analýzami povrchu DTM. Pro tyto účely byla použita skupina hydrologických a hydrografických analýz DMT.

7.3.2 Geografické informační systémy

Analytické nástroje GIS byly použity pro odvození parametrů subpovodí pro kalibraci srážkoodtokového modelu. Byly používány pro zpracování charakteristik prvků krajinné sféry ovlivňující srážkoodtokový proces pro daná subpovodí – jmenovitě hydrologické parametry půdního prostředí a vegetačního pokryvu. Dále byl GIS použit pro zpracování meteorologického modelu, tj. k řešení distribuce srážek na jednotlivá subpovodí interpolačními metodami z bodových měření srážkoměrných stanic. Další oblastí využití GIS bylo zpracování a geovizualizace výsledků modelování.

7.3.3 Dálkový průzkum Země

DPZ byl použit jako zdroj informací o využití a pokryvu krajiny. Pro získání parametrů zohledňujících prostorovou lokalizaci a strukturu vegetace byla využívána geodatabáze pokryvu krajiny CORINE Land Cover (CLC), která byla vytvořena interpretací družicových snímků LANDSAT a dalších podpůrných dat do kategorií CLC nomenklatury. Dále bylo nástrojů DPZ využito k interpretaci krajinného pokryvu z leteckých snímků v měřítku 1:5 000.

Jednotlivé použité operace jsou následně popsány v kapitole 8. Analýzy byly prováděny v softwaru ArcGIS firmy ESRI z důvodu vyřešených exportních a importních formátů

se systémem pro hydrologické modelování. Byly použity různé verze a úrovně softwaru dle dostupnosti analytických nástrojů a požadavků extenzí pro tvorbu exportních souborů.

7.4 Modelové povodí

Zpracování případové studie probíhalo na povodí Lubiny, které bylo vyhodnoceno jako vhodné malé povodí pro zpracování z následujících důvodů:

- Povodí má výraznou výškovou členitost (225 – 1256 m n.m.) s proměnlivými sklony svahů (srovnání výsledků modelování není vztaženo na jednotvárný reliéf).
- V návaznosti na předchozí bod je povodí pokryto rozmanitou mozaikou půdních podmínek i vegetačního pokryvu.
- Povodí je svou podhorskou polohou vystaveno přívalovým srážkám a na nechráněných místech horního toku existuje riziko povodní.
- Velikost průtoků v povodí není ovlivňována přímou manipulací na vodních nádržích. Malé vodní nádrže plní pouze retenční funkce. (Kaňok 1987)
- Na povodí jsou provozovány srážkoměrné a vodoměrné stanice ČHMÚ ve všech výškových úrovních (nedochází k nevhodnému rozložení srážek na povodí).
- Velikost povodí je vhodná pro vyhodnocení krajinného pokryvu z leteckých snímků.

7.4.1 Hydrologie

Řeka Lubina je pravostranným přítokem Odry a ústí do ní u Košatky nad Odrou (okres Nový Jičín). Je tedy řekou II řádu, s číslem hydrologického pořadí 2-01-01-125. Pramení v Moravskoslezských Beskydech na severozápadním svahu hory Radhošť ve výšce asi 740 m n. m., modelované povodí je zakončeno vodoměrným profilem Petřvald v 235 m n.m.

Od pramene vodní tok směřuje s menšími odchylkami k severu. Krátké úseky horních toků Lubiny a jejich zdrojnic se nacházejí na severních svazích Beskyd, následně Lubina protéká ve Frenštátské brázdě Frenštátem pod Radhoštěm, východně míjí Lichnov i Kopřivnici a pak protéká Příborskou pahorkatinou a městem Příbor. U dolního toku se nalézají obce Skotnice, Mošnov, Petřvald a za Košatkou (část obce Stará Ves nad Ondřejnicí) se řeka vlévá v Oderské bráně do Odry.

Největší vodní nádrž v povodí je v. n. Větrkovice, která se nachází severovýchodně od Kopřivnice na Svěceném potoce (plocha: 0,215 km²; stálý objem: 0,06 mil. m³; zásobní objem: 1,12 mil. m³; funkce: průmyslová, rekreační) (Vlček 1984).

Průměrná roční výška srážek na povodí je 906 mm, průměrný roční odtok činí 384 mm. (Kříž 2004)

Říční síť v povodí Lubiny a použité srážkoměrné a vodoměrné stanice jsou graficky znázorněny v příloze 1.

Tab. 4. Hydrologické charakteristiky vztažené k závěrovému profilu Petřvald (HMÚ 1967)

Přůmerný průtok Q_a	1letý průtok Q_1	10letý průtok Q_{10}	50letý průtok Q_{50}	100letý průtok Q_{100}
2,36 m ³ .s ⁻¹	37 m ³ .s ⁻¹	140 m ³ .s ⁻¹	226 m ³ .s ⁻¹	260 m ³ .s ⁻¹

7.4.2 Klima

Značný vliv na odtokové poměry má klima. Nejdůležitějším klimatickým činitelem jsou srážky, a to jejich úhrn za rok, jejich roční chod a intenzita. Z dalších klimatických prvků jsou pro vláhovou bilanci povodí a režim odtoků důležité teplota ovzduší a její roční chod a sytostní doplněk, který spolurozhoduje o velikosti výparu. (Netopil 1970)

Povodí leží v mírném pásmu na hranici mezi kontinentálním a přímořským klimatem. Pro zkoumané území je typický výskyt vzduchových hmot mírných šířek. Dle E. Quitta (1971) se pramenná část povodí nachází v klimatické oblasti CH6 a CH7. Směrem po toku se rozkládá oblast MT2, která zasahuje až za Frenštát pod Radhoštěm a Lichnov. Na ni navazuje oblast MT9 a MT10, která se vyskytuje přibližně od Kopřivnice až po ústí Lubiny. Charakteristiky těchto oblastí jsou popsány v Tab. 5. (Buzek et al. 1986, AOPK 2008)

Tab. 5. Charakteristiky klimatických oblastí povodí Lubiny (dle Quitt 1971)

	Chladná		Mírně teplá		
	CH6	CH7	MT2	MT9	MT10
Počet letních dnů	10 – 30	10 – 30	20 – 30	40 – 50	40 – 50
Počet dnů s průměr. teplotou 10 °C a více	120 – 140	120 – 140	140 – 160	140 – 160	140 – 160
Počet mrazových dnů	140 – 160	140 – 160	110 – 130	110 – 130	110 – 130
Počet ledových dnů	60 – 70	50 – 60	40 – 50	30 – 40	30 – 40
Prům. teplota v lednu (°C)	-4 – -5	-3 – -4	-3 – -4	-3 – -4	-2 – -3
Prům. teplota v červenci (°C)	14 – 15	15 – 16	16 – 17	17 – 18	17 – 18
Prům. teplota v dubnu (°C)	2 – 4	4 – 6	6 – 7	6 – 7	7 – 8
Prům. teplota v říjnu (°C)	5 – 6	6 – 7	6 – 7	7 – 8	7 – 8
Prům. počet dnů se srážkami 1 mm a více	140 – 160	120 – 130	120 – 130	100 – 120	100 – 120
Srážkový úhrn ve veget. období (mm)	600 – 700	500 – 600	450 – 500	400 – 450	400 – 450
Srážkový úhrn v zimním období (mm)	400 – 500	350 – 400	250 – 300	250 – 300	200 – 250
Počet dnů se sněhovou pokrývkou	120 – 140	100 – 120	80 – 100	60 – 80	50 – 60
Počet dnů zamračených	150 – 160	150 – 160	150 – 160	120 – 150	120 – 150
Počet dnů jasných	40 – 50	40 – 50	40 – 50	40 – 50	40 – 50

7.4.3 Geomorfologie

Z hlediska geomorfologického členění se povodí nachází v provincii Západní Karpaty. Pramenná oblast Lubiny i se svými zdrojnicemi zasahuje do Radhošťské hornatiny Moravskoslezských Beskyd poměrně krátkými úseky horních toků. Dále směrem k severu povodí zasahuje do Frenštátské brázdy – vnitrohorské deprese Podbeskydské pahorkatiny. Hranice Radhošťské hornatiny na styku s Frenštátskou brázdou je velmi ostrá a erozně denudační svahy se zvedají nad dno brázdy krátkým příkrým svahem z výšky 400 – 500 m n.m. do výšek 1000 m n.m. na vzdálenost 2 km. Tento svah výrazněji narušuje vyústění údolí Bystrého potoka a Lomné. Střední část povodí spadá do oblasti Štramberské vrchoviny a Příborské pahorkatiny. Území dolního toku Lubiny se již nachází na území Moravské brány, konkrétně v Oderské bráně. Nejvyšší bod v povodí je vrchol Kněhyně (1257 m n.m.). Nejnižší položené místo v povodí se nachází při ústí do Odry (222 m n.m.).

7.4.4 Geologie

Geologické poměry odrážející se i v tvarech reliéfu mohou ovlivňovat převod na povrch spadlé a po něm odtékající vody do větších hloubek pod zemským povrchem. Míra jejich účinku závisí na stupni propustnosti hornin. Vlastnosti zóny zvětrávání a zvětralinové pokrývky jsou mnohdy důležitější než míra propustnosti matečných hornin. (Netopil 1970) Níže uvedenou charakteristiku geologických poměrů povodí Lubiny lze vyčíst z přehledné geologické mapy Beskyd a Podbeskydské pahorkatiny v měřítku 1 : 100 000 a také pomocí schématu regionálně geologických jednotek ve stejném měřítku, jež tvoří přílohu mapy. Oblast povodí u ústí Lubiny do Odry spadá do spodnobádenské vněkarpatské předhlubně. Ta zhruba u města Mošnov přechází v podslezskou jednotku, která sahá až ke Kopřivnici. V této části povodí se navíc severně od města Příbor rozprostírá dílčí příkrov godulského vývoje slezské jednotky – těšínský příkrov. Jižně a jihovýchodně od Kopřivnice se nachází oblasti bašského vývoje slezské jednotky. Zbývá část zkoumané oblasti, tzn. povodí horního toku Lubiny, náleží ke slezské jednotce tvořené dílčím příkrovem godulským. (ÚÚG 1985)

V povodí se nacházejí především horniny druhohorního (křída až jura) a kvartérního stáří. Okolí vodních toků tvoří fluvialní sedimenty údolních niv a nižších údolních teras, povodňové hlíny a štěrky holocenního stáří (würm). Dolní a střední část povodí je z velké části tvořená sprašovými hlínami (würm). Místa se zde nachází také glacifluviální štěrkovité písky a písčité štěrky okrajové facie sálského zalednění (riss). Při přechodu ze střední do horní části povodí se zvyšuje zastoupení deluviálních hlinitých sedimentů holocenního až pleistocenního stáří. Povodí horního toku je budováno hlavně fluvialními písčitými štěrky vyšších údolních teras (würm) a fluvialními štěrky a písky svrchní akumulace hlavní terasy (riss).

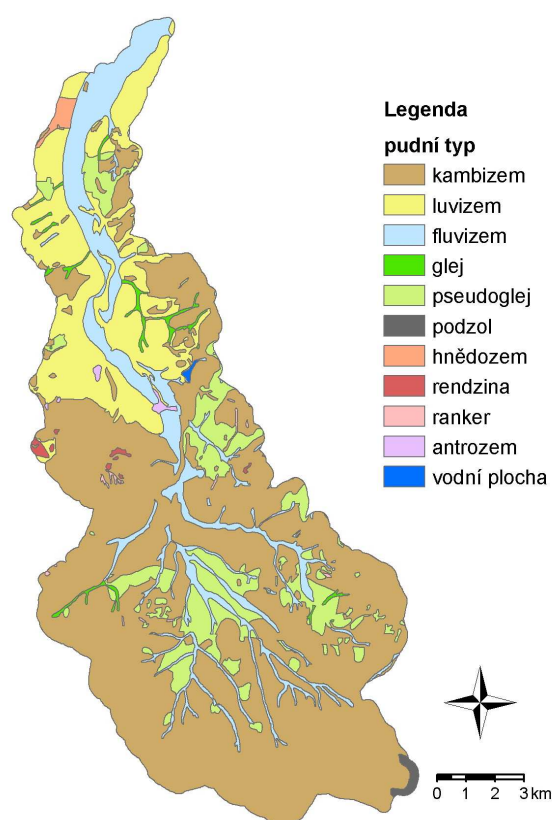
Horniny druhohorního stáří se vyskytují až od středního toku povodí směrem k hornímu toku. Místa se v oblasti středního toku nachází středně rytmický flyš až subflyš s rohovcovými pískovci (bašské vrstvy slezské jednotky) a chlebovické vrstvy s polohami slepenců (bašský vývoj slezské jednotky). Mezi městy Kopřivnice a Frenštát p. R. se táhne linie zhruba ve směru SV – JZ s ostrůvky vyvřelin a pyroklastik těšínitové asociace ve slezské jednotce.

V západní části horního toku se ostrůvkovitě vyskytují rudohnědé nevápnité jílovce, místa s drobně rytmickými písčitými flyšovými a subflyšovými sekvencemi (tzv. pestré godulské vrstvy slezské jednotky) a písčité flyš až subflyš s šedými a zelenými chondritickými skvrnitými jílovci a obzorem křemitých pískovců s rohovci (lhotecké vrstvy slezské jednotky godulského vývoje). Ve východní části horního toku se místa nalézají zejména

hrubě rytmičtý flyš a až subflyš s převahou tmavošedých a hnědošedých vápnitých jílovců, ve spodní části s polohami pískovců (tzv. hradištské vrstvy) a černé prokřemenělé jílovce (tzv. veřovické vrstvy slezské jednotky godulského vývoje). Pramenné oblasti jsou budovány především hrubě rytmičtým flyšem se silně lavicovitými glaukonitickými pískovci (tzv. godulské vrstvy slezské jednotky). (ÚÚG 1985)

7.4.5 Půdy

Proces přechodu povrchového odtoku vody v podzemní silně ovlivňují půdy, protože jejich vlastnosti podmiňují intenzitu vsakování vody do hlubších vrstev zvětralin. Při hledání příčin vysokého či nízkého povrchového odtoku je nutné studovat nejen druhy a typy půd a jejich podíl na celkové ploše povodí, ale i míru propustnosti půd, která je ovlivněna jejich strukturou, obsahem humusu, CaCO_3 a dalších solí, jejich stavem vlhkosti a jinými vlastnostmi, které se během roku mohou měnit. (Netopil 1970)



Obr. 29. Půdní typy na povodí Lubiny (upraveno podle AOPK 2008)

V pahorkatinné oblasti převládají zejména mezotrofní a pseudoglejové kambizemě. Jsou to půdy převážně hlinité, šterkovité, shora kypré a vespod ulehlé. Chudší kambizemě na pískách a morénách jsou šterkovité a lehké. Středně bohatý pseudoglejový typ převažuje na sprašových hlínách. Je hlinitý až jílovitohlinitý a často vrstevnatě uložený. Fluvizemě se nacházejí především v dolní části povodí a taktéž v úzkých pruzích podél toku Lubiny a jejich přítoků. Vznikly vrstvením splaveného materiálu z pahorkatin. Mají převážně lehčí ráz a jsou středně bohaté, převážně hlinité, místy písčitohlinité a vespod až jílovitohlinité. (Plíva, Žlábek 1986)

Horní část povodí se nachází v Moravskoslezských Beskydech, kde je díky geologickému podloží flyše a příznivému mezoklimatu minimálně vyvinuta výšková půdní stupňovitost.

Výrazně nejrozšířenějším půdním typem jsou kambizemě. V nejvyšších polohách se nacházejí kryptopodzoly a podzoly a v okolí toků fluvizemě. Vesměs se jedná o půdy velmi hluboké, středně bohaté na živiny a s vysokou produkční schopností. Z hlediska zrnitosti převládají půdy kamenité, jílovitohlinité a hlinitopísčité. Horské půdy mají vysoký obsah štěrku (10 – 20%) a v převládajících jílovitohlinitých půdách je podíl jednotlivých frakcí jemnozeme silně ovlivněn litologickým charakterem půdotvorného substrátu. (Buzek 1986, Průša 2001)

7.4.6 Vegetace

Velký vliv na odtok vody z povodí a na režim odtoku má vegetace. Tento vliv může být kladný i záporný podle toho, jaký druh vegetace pokrývá povodí nebo jak jsou jednotlivé druhy vegetace na povodí zastoupeny. Účinek jednotlivých druhů vegetace je značně proměnlivý a závislý na mnoha jejich vlastnostech. Největší vliv má z vegetačních formací les. Ten má obvykle příznivý vliv na odtok vody a působí jako regulátor odtoku. (Netopil 1970)

Lesnatost povodí, která se určuje jako podíl součtu zalesněných ploch a celkové plochy povodí, je asi 30 %. Z mapy lesních typů vyplývá, že lesní oblasti v povodí Lubiny se vyskytují od dubového po bukosmrkový lesní vegetační stupeň (tzn. 1. až 7. LVS). Většina lesů (43,4 %) v povodí náleží do bukového vegetačního stupně. Největší podíl (23,4 %) z celkové plochy lesních porostů pokrývá bohatá bučina (4B) a dále pak svěží bučina (4S), která tvoří 11,4 % lesů. Významný podíl lesních společenstev (31 %) se nachází také v jedlobukovém vegetačním stupni. Zde se vyskytuje především svěží jedlová bučina (5S), bohatá jedlová bučina (5B), svahová jedlová bučina (5F) a klenová bučina (5A). Za zmínku stojí ještě smrkobukový lesní vegetační stupeň, který tvoří 14,4 % celkové plochy lesů a je zastoupen hlavně svěží smrkovou bučinou (6S) a svahovou smrkovou bučinou (6F).

8 STAVBA SRÁŽKOODTOKOVÉHO MODELU

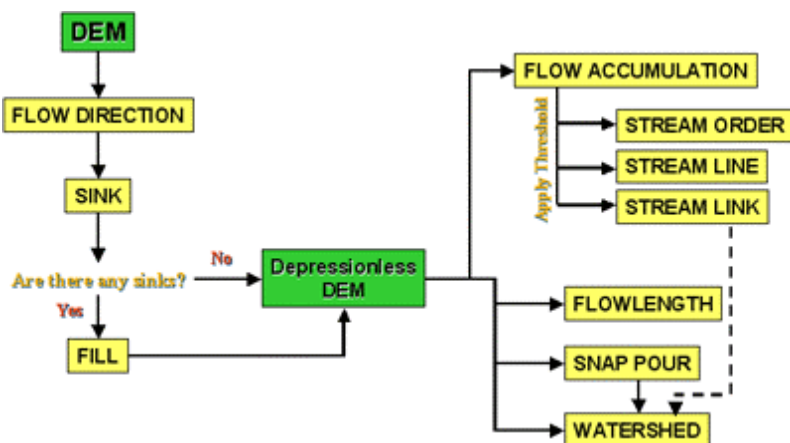
Stavbou srážkoodtokového modelu (též preprocessing) je nazývána posloupnost kroků, které vedou k vytvoření geometrické kostry (orientovanému grafu) povodí v případě semidistribuívaného modelu zpracovávaného povodí a k odvození hydrografických parametrů jednotlivých subpovodí a odtokových linií a odvození parametrů krajinné sféry, které jsou potřebné pro vybranou metodu použitou v jednotlivých komponentech srážkoodtokového modelu (kapitola 7.1). Tato posloupnost ve většině případů probíhá v geografickém informačním systému a je zakončena přenesením těchto parametrů do srážkoodtokového modelovacího systému pomocí některého z typů propojení (kapitola 5.8.3)

V případě HEC-HMS je k dispozici preprocessingový nástroj v podobě extenze pro ArcGIS, který obsahuje nástroje GIS shrnuté v nabídce dle následnosti použití a umožňuje tak využít nástrojů GIS i pro nespécializované uživatele. Výhodou tohoto nástroje také je tvorba exportního souboru ve struktuře akceptované HEC-HMS.

8.1 Zpracování povodí a odtokové sítě analýzou povrchu

Základním krokem ke stavbě semidistribuívaného modelu povodí je tzv. schematizace povodí, což je sled dílčích kroků vedoucí k nahrazení drenážní sítě v povodí formou orientovaného grafu, jehož vrcholy nahrazují jednotlivá subpovodí, jeho hrany nahrazují vodní toky a uzly soutoky jednotlivých toků.

Schematizace je postavena na skupině hydrologických analýz povrchu DMT, jejichž cílem je na základě stanovení směru odtoku vody po modelu terénu odvodit odtokové linie a dílčí subpovodí. Schematicky je možno vyjádřit postup analýzy na Obr. 30, jednotlivé kroky a jejich posloupnost jsou následně rozepsány dále v textu.



Obr. 30. Postup stanovení povodí a odtokových linií z DMT. (ESRI 2006 b)

8.1.1 Tvorba a úprava digitálního modelu terénu

Pro tvorbu DMT vhodného pro hydrografické analýzy je doporučováno použít interpolační algoritmus založený na programu ANUDEM (Hutchinson 1989, Hutchinson, Gallant 2000), který je od verze ArcGIS 9 obsažen v nástroji Topo to Raster (nebo TopoGrid v ArcInfo 7). (ESRI 2006 c)

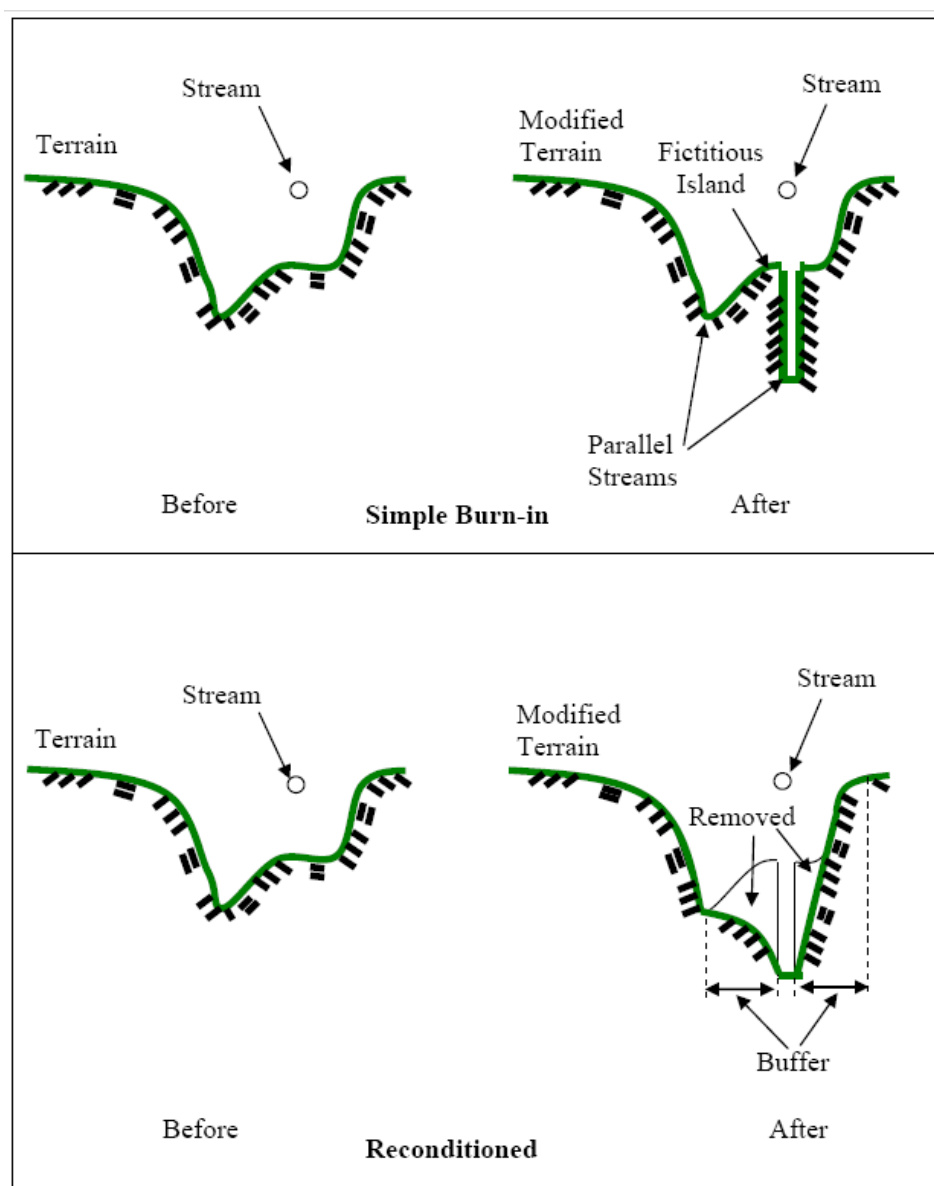
Tento interpolační algoritmus je optimalizován pro tvorbu DMT zachovávajícího v hydrologii potřebné tvary terénu (hřbety, údolnice, konvexnost, konkávnost). Jeho další výhodou v podmínkách ČR je ošetření práce přímo s vrstevnicemi jako zdrojem výškových dat a možnost použití dalších informací o terénních hranách ze ZABAGED – jsou podporovány následující typy dat:

- BOUNDARY - polygonová vrstva hranice interpolace. Buňky za hranicí jsou označeny „NoData“,
- CONTOUR - liniová vstupní vrstva vrstevnic,
- LAKE - polygonové téma vodních ploch, při interpolaci je reprezentována vodorovnou plochou s nejnižší nalezenou výškou na hranici polygonu,
- SINK - vstupní bodová vrstva reprezentující známé terénní deprese, které nemají být odstraněny,
- POINTELEVATION - bodová vrstva reprezentující výškové body terénu,
- STREAM - liniová vstupní vrstva reprezentující lokalizaci vodních toků.

Pro spuštění interpolace jsou požadovány následující parametry:

- in_topo_features – vstupní vrstvy (viz výše),
 - cell_size – velikost výstupní buňky rastru,
 - extent – X, Y koordináty pro výstupní rastr (nepovinný parametr, je možné jej nahradit vrstvou hranice interpolace),
 - minimum_z_value - minimální hodnota výšky použitá v interpolaci,
 - maximum_z_value – maximální hodnota výšky použitá v interpolaci,
 - enforce – přepínač vyplňování bezodtokých terénních depresí a tvorby hydrologicky korektního gridu (implicitně zapnuto),
 - discrete_error_factor – příkaz pro nastavení vyhlazování při interpolaci rastru, interval je v rozmezí <0,2>, čím vyšší hodnota, tím vyšší vyhlazování,
 - out_stream_features – nastavení výstupní vrstvy hřbetnic, údolnic a odtokové sítě (tato vrstva nemusí být zadána jako výstupní, vytváří se implicitně při začátku interpolace rastru),
 - out_sink_features - nastavení výstupní vrstvy bezodtokých terénních depresí (podobně jako v předchozím případě se vrstva vytváří implicitně během interpolace),
 - out_diagnostic_file – výstupní textový soubor diagnostiky interpolace,
 - out_parameter_file – výstupní soubor parametrizace pro případné další spuštění
- Topo to Raster se stejnými parametry.

Následně může být digitálního model terénu upraven ve smyslu vnesení známé polohy vodních toků do reprezentace povrchu terénu. Problémem je, že poloha vodního toku zjištěná jinou metodou než odvozením ze zpracovávaného digitálního modelu terénu pravděpodobně nebude odpovídat údolnici v DMT. To je možné řešit technikou tzv. „vypalování“ (burning in techniques), kdy je poloha vodního toku vnesena do výškové struktury buněk DMT tak aby byl zachován spád vodního toku. Klasická technika čistého vypalování vodního toku pouze do příslušné buňky však přináší při modelování problém s bifurkací vodního toku a tvorbě „ostrovů“ při tvorbě odtokových linií. Proto byla dána k dispozici v HEC-GeoHMS ve verzi 4.2 (tj. pro ArcGIS 9.x) vylepšená technika, která umožňuje upravit okolí „vypalovaného“ bodu tak, aby došlo k postupnému snižování výšky v okolí vnášeného vodního toku. Graficky je postup „vypalování“ a srovnání obou technik zobrazen na Obr. 31.



Obr. 31. Příčný profil digitálním modelem terénu v místě „vypalovaného“ vodního toku a srovnání technik.

Tato technika byla vyvinuta pro ArcInfo již v roce 1997 jako metoda AGREE v rámci ArcHydro Tools (Maidment 2010) a v HEC-GeoHMS je implementována jako Terrain reconditioning. Při použití tohoto nástroje je nutné zadat parametry pro:

- Stream buffer – tj. počet buněk v okolí vodního toku, které budou použity pro postupné snižování výšky terénu směrem k vodnímu toku (Obr. 31).
- Smooth drop/raise – určuje celkovou hloubku „zařezání“ buňky vodního toku oproti hodnotě buňky původního DMT (ve vertikální jednotkách DMT).
- Sharp drop/raise – určuje hloubku „zařezání“ buňky vodního toku oproti okolním upraveným buňkám ve vertikální jednotkách DMT.

Postup při Terrain reconditioning je následující (dle Maidment 2010):

1. Transformace linií vodních toků na rastrový datový model – poloha buněk reprezentujících vodní tok odpovídá poloze vektorové reprezentace, ostatní buňky mají hodnotu NoData.

$$\text{vectgrid} = \text{linegrid} (\% \text{vectcov} \%)$$

2. Výpočet smooth drop/raise grid (smogrid). Buňky v tomto gridu odpovídající poloze vektorové reprezentace vodních toků mají hodnotu originálního gridu plus zadanou hodnotu poklesu/zdvihu, ostatní buňky mají hodnotu NoData .

$$\text{smogrid} = \text{int} (\text{setnull} (\text{isnull} (\text{vectgrid}), (\% \text{oelevgrid} \% + \% \text{smoothdist} \%)))$$

3. Výpočet gridu vzdálenosti od vektorové reprezentace vodních toků – buňky gridu „vectdist“ nesou informaci o vzdálenosti od nejbližší buňky rastru „vectgrid“. Následuje výpočet vektor allocation gridu (vectallo), jehož buňky nesou informaci o výšce nejbližší buňky rastru „vectgrid“.

$$\text{vectdist} = \text{eucdistance} (\text{smogrid}, \#, \text{vectallo}, \#, \#)$$

4. Výpočet gridu obalové zóny kolem vodních toků (bufgrid2) o zadané vzdálenosti. Buňky gridu mimo obalovou zónu nesou hodnotu původního digitálního modelu terénu, buňky uvnitř obalové zóny mají hodnotu NoData.

$$\begin{aligned} \text{bufgrid1} &= \text{con} ((\text{vectdist} > (\% \text{buffer} \% - (\% \text{cellsize} \% / 2))), 1, 0) \\ \text{bufgrid2} &= \text{int} (\text{setnull} (\text{bufgrid1} == 0, \% \text{oelevgrid} \%)) \end{aligned}$$

5. Výpočet gridů vzdálenosti obalové zóny (bufdist a bufallo). Buňky gridu bufdist nesou informaci o vzdálenosti k nejbližší buňce gridu bufgrid2 s platnou hodnotou. Buňky gridu bufallo nesou informaci o hodnotě výšky nejbližší buňky s platnou hodnotou.

$$\text{bufdist} = \text{eucdistance} (\text{bufgrid2}, \#, \text{bufallo}, \#, \#)$$

6. Výpočet gridu s modifikovanou výškou v obalové zóně (smoelev). Výsledkem je modifikace výšky v obalové zóně, která postupně snižuje hodnotu výšky směrem k poloze vodního toku o zadanou hodnotu. Buňky mimo obalovou zónu mají hodnotu původního DMT.

$$\text{smoelev} = \text{vectallo} + ((\text{bufallo} - \text{vectallo}) / (\text{bufdist} + \text{vectdist})) * \text{vectdist}$$

7. Výpočet gridu s modifikovanou výškou buněk vodního toku (shagrid). V tomto kroku dojde k dalšímu snížení výšky buněk gridu smoelev v místě průběhu vodních toků o zadanou hodnotu (sharpdist). Všechny ostatní buňky nesou hodnotu NoData.

$$\text{shagrid} = \text{int} (\text{setnull} (\text{isnull} (\text{vectgrid}), (\text{smoelev} + \% \text{sharpdist} \%)))$$

8. Výpočet modifikovaného DMT (elevgrid). V tomto kroku dochází ke kombinaci gridu s hodnotou původní výšky mimo obalovou zónu a modifikovanou (postupně snižovanou) hodnotou výšky uvnitř obalové zóny s gridem snížených výšek (o zadanou hodnotu sharp) v místě průběhu vodních toků.

$$\text{elevgrid} = \text{con} (\text{isnull} (\text{vectgrid}), \text{smoelev}, \text{shagrid})$$

8.1.2 Vyplnění bezodtokých oblastí

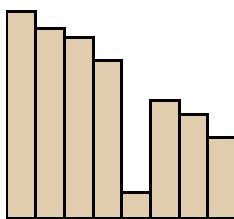
Tak jako u jiných interpolačních algoritmů je i při použití algoritmu Topo to Raster a případném provedení Terrain reconditioning vhodné před dalšími hydrologickými analýzami odstranit buňky rastru s chybně interpolovanou nadmořskou výškou, které tvoří lokální deprese – sinks. Při zadání parametru ENFORCE při interpolaci pomocí tohoto algoritmu by mělo dojít k jejich odstranění, je však vhodné tuto skutečnost před dalšími pracemi ověřit.

Tyto chyby představují falešná bezodtoká území, čímž deformují odtokové linie a vytváří vlastní subpovodí. (Existují i chyby tvořící lokální vyvýšeniny – peaks, spikes – ale tyto nezpůsobují výrazné chyby v procesu stanovení odtokových linií a povodí)

Odstranění chybových bezodtokých oblastí

Pokud není nutno identifikovat polohu výše zmíněných chyb (sinks) pro identifikaci přirozených bezodtokých oblastí, je možné vyplnit je přímo v DMT pomocí funkce Fill. Při jejím použití dojde k dorovnání chybné výšky v identifikované buňce rastru na úroveň nejnižší okolní buňky. Toto vyplňování je nutno opakovat několikrát, jelikož teprve po vyplnění jedné sink může být zjištěna chyba tvořená okolními buňkami.

Po odstranění bezodtokých území vznikne tzv. hydrologicky korektní DMT, který má tu vlastnost, že voda spadlá do libovolné části povodí po povrchu doteče do závěrového profilu.



Obr. 32. Řez digitálním modelem terénu v místě chybně interpolované výšky – chyba SINK. (ESRI 2006a)

Pokud se v území předpokládá možnost existence přirozených bezodtokých oblastí a je třeba s nimi pracovat, je možné identifikovat jejich polohu pomocí funkce Sink, která jako vstupní data používá rastr směru odtoku vytvořený dle postupu v kapitole 8.1.3.

Rozlišení přírodních bezodtokých území od chyb

Při použití funkce Fill je možno volitelně zadat maximální hloubku sink, při které dojde k jejímu odstranění. Pokud je hodnota hloubky této sink (nebo skupiny sinks) větší než zadaná hodnota, předpokládá se existence přirozené bezodtoké sníženiny, která nemá být odstraněna.

Pro podporu rozhodování uživatele, jaká hloubka bezodtoké oblasti již znamená přirozený morfologický rys terénu, je možné následujícím postupem vytvořit rastr s hloubkami jednotlivých nalezených bezodtokých oblastí.

- a. Vytvořit rastr bezodtokých oblastí pomocí funkce Sink.
- b. Vytvořit rastr povodí příslušejících jednotlivým sinks (Tvorba rastru povodí je popsána v kapitole 8.1.8).
- c. Vytvořit rastr minimálních výšek v každém povodí např. pomocí Raster Calculator „sink_min = zonalmin (povodí, elevation)“.

Stejným způsobem se vytvoří rastr maximálních výšek vyplnění sinks v každém povodí „sink_max = zonalfill (povodí, elevation)“

Následně se odečtou vytvořené rastry minimálních a maximálních výšek v povodí, čímž vznikne rastr hloubek bezodtokých oblastí „sink_depth = sink_max–sink_min“ (ESRI 2006 a)

Na základě tohoto rastru může uživatel rozhodnout ve které oblasti hodlá pracovat s přirozenými bezodtokými oblastmi, zjistit jejich hloubky a limitovat jimi vyplňování interpolačních chyb – sinks.

8.1.3 Směr odtoku

V případě existence hydrologicky korektního DMT je prvním krokem v odvozování odtokových linií i povodí definování směru odtoku vody po povrchu DMT.

Existují dvě varianty řešení směru odtoku – Single flow direction (SFD) a Multiple flow direction (MFD). SFD algoritmus předpokládá že povrchový a podpovrchový odtok probíhá pouze ve směru největšího spádu z dané buňky, MFD algoritmus uvažuje odtok do nižších poloh ve všech směrech.

Jelikož kromě modelování odtoku v extrémním reliéfu (Fárek, Unucka, 2010) nedochází k výraznému ovlivnění modelovaných parametrů (Wolock, 1995), byl použit algoritmus SFD, který je dostupný v ArcGIS.

Princip odvození SFD je založen na vyhledání největšího lokálního poklesu terénu, který je vypočten jako podíl změny výšky a vzdálenosti sousedících buněk v rastru DMT.

$$pokles = \frac{\Delta z}{d}, \text{ kde} \quad [5.1]$$

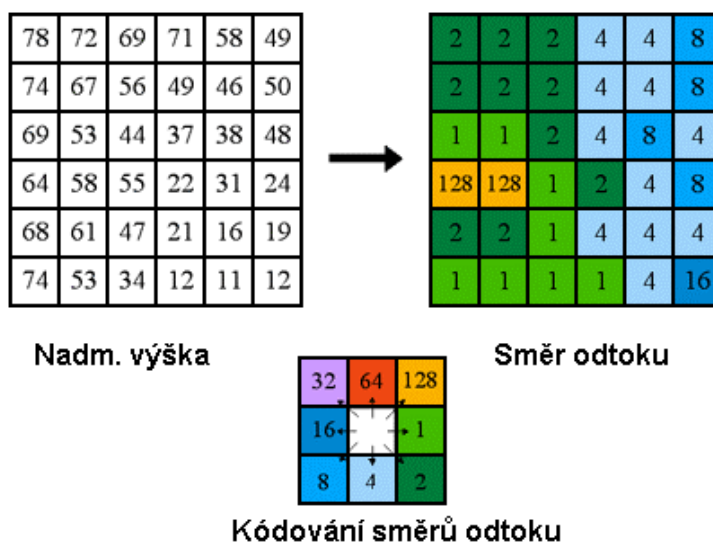
Δz ...rozdíl výšek mezi sousedními buňkami rastru DMT

d vzdálenost středů sousedních buněk rastru DMT

U největšího nalezeného lokálního poklesu je určena jeho orientace a následně je buňka kódována mocninou 2 dle směru orientace (Obr. 33).

Tato funkce je provedena na všech buňkách rastru DMT a výsledkem je rastr směru odtoku (FLOWDIRECTION GRID).

Tato funkce je v ArcGIS 9 implementována v Toolboxu „Flow Direction“ ve skupině Spatial Analyst Tools/ Hydrology.

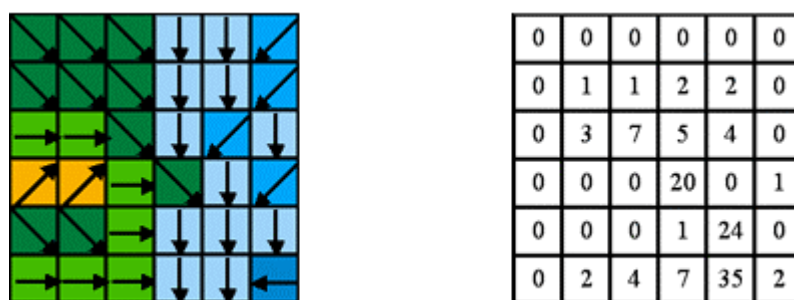


Obr. 33. Princip odvození směrů odtoku a jejich kódování ve výsledném rastru. (ESRI 2006 b)

Takto vzniklý rastr je dále používán k odvozování jak odtokových linií, tak povodí, přičemž od tohoto kroku dále se postup liší a je popsán v samostatných kapitolách.

8.1.4 Koncentrace odtoku

Dalším krokem vedoucím teď již pouze ke stanovení odtokových linií je určení tzv. hodnoty akumulace vody v každé buňce rastru, tj. sumy všech buněk, ze kterých přitéká voda do dané buňky („Flow Accumulation“). Výsledkem je rastr s hodnotami reprezentujícími počet buněk, z nichž stéká voda do zjišťované konkrétní buňky. Jelikož je známa velikost buňky rastru, jedná se v podstatě o určení plochy povodí pro každou z buněk rastru.



Obr. 34. Princip stanovení koncentrace odtoku z rastru směru odtoku. (ESRI 2006b)

8.1.5 Definice odtokové linie

Odtokovými liniemi jsou zde nazývány takové části terénu, ve kterých dochází ke koncentraci srážkové či tavné vody stékající povrchovým či podpovrchovým odtokem a dochází v nich ke vzniku vodoteče. Z digitálního modelu terénu nelze určit, zda takový vodní tok skutečně existuje, je dočasný nebo permanentní, a proto je vhodnější nepoužívat na odtokové linie odvozené pouze z DMT termín vodní tok.

Z hlediska uživatele je definování odtokové linie nejproblematictější krokem, neboť ta se definuje jako oblast, kde hodnota koncentrace odtoku překročí určitý práh (threshold). Určit hodnotu prahu je komplikované, jelikož závisí jak na klimatických podmínkách, tak na lokálních vlastnostech krajiny. Ideální variantou je empirické porovnání výsledků s terénním mapováním, nebo alespoň použití referenčního mapového podkladu v odpovídajícím měřítku. Dle Šercl (2004) se však prahová hodnota zpravidla určuje jako podíl plochy k závěrovému profilu celého povodí, např. 1%. Výsledkem je rastr s hodnotou „1“ v každé buňce splňující podmínku překročení počtu „přispívajících“ buněk

Prakticky je možné použít více funkcí:

streamnet = con (flowacc > 100, 1) - funkce přiřadí buňkám rastru koncentrace splňujícím podmínku hodnoty větší než „100“ hodnotu „1“,

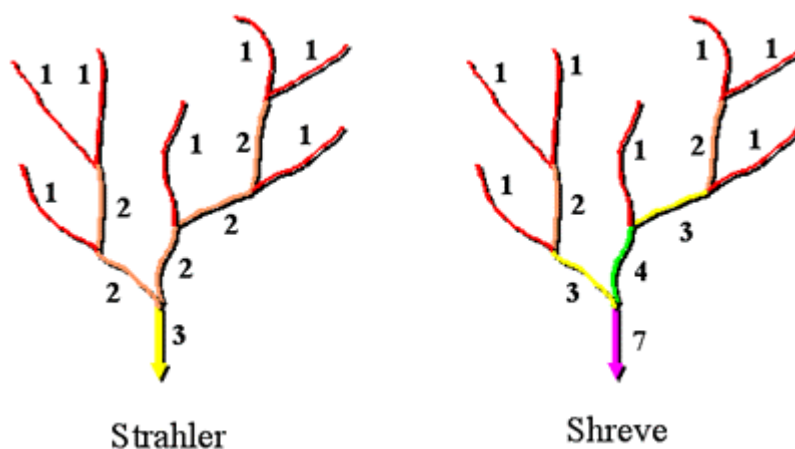
streamnet = setnull (flowacc < 100, 1) – funkce přiřadí hodnotu „No data“ všem buňkám rastru koncentrace splňujícím podmínku hodnoty menší než „100“ a hodnotu „1“ všem ostatním,

reclassify – je nutno provést reklasifikaci rastru do dvou hodnot „1“ pro odtokovou linii a „0“ nebo „No Data“ pro ostatní buňky rastru.

8.1.6 Identifikace odtokové linie

Při identifikaci odtokových linií jsou linie rozděleny na jednotlivé úseky (od počátku k soutoku, mezi soutoky a od soutoku k závěrovému profilu). Každému takovému úseku je přidělen jedinečný identifikátor, přičemž všechny buňky v daném úseku jej mají stejný. Tento krok se provádí pomocí funkce StreamLink, která pracuje na principu kombinace rastru odtokových linií a rastru směrů odtoku. Přidělený identifikátor úseku toku je následně použit jednak pro vektorizaci (dělení do úseků zůstává), tak při stanovení dílčích subpovodí (viz dále).

Variantou identifikace používanou především geomorfology je rozlišení úseků ne jednoznačným identifikátorem, ale kódem řádu toku dle Strahlera nebo Shrevea. Rozdíl mezi metodami je patrný z Obr. 35. Toto dělení se při stavbě hydrologickým modelů nepoužívá, jelikož chybí jednoznačná identifikace úseku toku a tím i příslušného subpovodí.

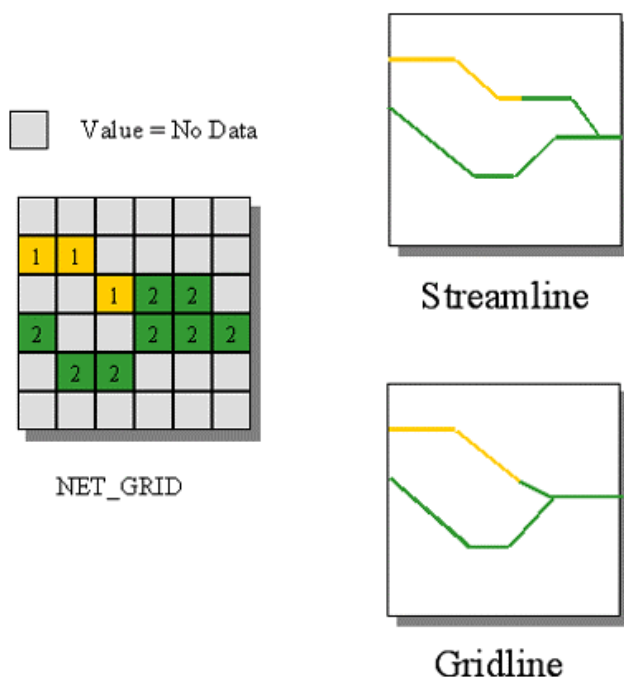


Obr. 35. Klasifikace odtokových linií kódem řádu toku. (ESRI 2006b)

8.1.7 Vektorizace odtokové linie

Posledním krokem identifikace odtokových linií je jejich převedení z rastrového do vektorového datového modelu – vektorizace.

Lze použít přímo funkci zařazenou mezi hydrologické nástroje Toolboxu „Stream to Feature“ nebo přímo převést rastrovou reprezentaci na vektorovou „Convert Raster to Feature“. Pro vektorizaci odtokových linií je vhodnější použití funkce „Stream to Feature“, jejíž algoritmus lépe ošetřuje problematické souběžné průběhy odtokových linií v rastru – umožňuje vektorizaci souběžných linií (Obr. 36). Vektorové liniové úseky toku vznikají na základě identifikátoru (hodnoty buněk rastru identifikovaných odtokových linií) a přebírají jej jako atribut.



Obr. 36. Průběh vektorizace „soutoků“ odtokových linií pomocí funkcí „Stream to Feature (Streamline)“ a „Convert Raster to Feature (Gridline)“. (ESRI 2006d)

8.1.8 Stanovení povodí

Stanovení povodí opět vychází z rastru směru odtoku, přičemž dochází k hledání všech buněk, z nichž odtéká voda do zvoleného závěrového profilu. V postupu pouze dochází k použití rozdílných vstupů podle toho, zda uživatel potřebuje definovat jeden závěrový profil pro celé povodí nebo více profilů pro stanovení dílčích povodí.

Pro definici celého povodí je nutno zvolit jeden závěrový profil, a to buď v rastrové nebo vektorové podobě (bodová vrstva). Dále je použita funkce „Watershed“, která vyhledá všechny buňky rastru směru odtoku, z nichž doteče voda do zvoleného závěrového profilu (pour point, outlet) a přidělí jim stejný identifikátor.

Při definování závěrového profilu je možno použít funkci „Snappour“, která přichytí zvolený bod k buňce s nejvyšší hodnotou rastru akumulace ve zvoleném okolí, čímž eliminuje možnost chybné definice závěrového profilu.

Pro stanovení dílčích povodí je možné použít závěrové profily jednotlivých subpovodí a to buď jako bodovou vrstvu nebo jako rastr, nejjednodušší variantou je použití přímo rastru identifikovaných odtokových linií.

Na základě tohoto rastru dojde k vytvoření povodí ke každé buňce představující odtokovou linii. Vzhledem k tomu, že každé dílčí povodí je identifikováno hodnotou získanou ze „závěrového profilu“ a všechny buňky jednoho úseku odtokové linie mají stejný identifikátor, bude výsledkem klasifikovaný rastr subpovodí, kde jednotlivá dílčí povodí budou odpovídat příslušnému úseku odtokové linie.



Obr. 37. Dílčí subpovodí definovaná na základě rastru směru odtoku a rastru identifikovaných úseků odtokových linií. (ESRI 2006b)

8.1.9 Vektorizace povodí

Vektorizací povodí dojde na převedení rastrové podoby povodí na vektorovou polygonovou vrstvu, nebo na liniovou vrstvu hraničních linií tj. rozvodnic. Vektorizace opět proběhne na základě identifikátoru buněk rastru, který je vložen odpovídajícímu vektorovému prvku do atributové tabulky.

8.2 Odvození hydrografických parametrů

Další dílčí analýzou prováděnou při stavbě srážkoodtokového modelu je odvození hydrografických parametrů pro odtokové linie a subpovodí. Zjištěné hodnoty níže uvedených parametrů jsou ukládány do atributových tabulek vektorizovaných odvozených linií (u HEC-GeoHMS defaultně „River“) a subpovodí („Watershed“).

Je také vytvořena bodová vrstva těžiště subpovodí a liniové vrstvy maximální délky toku v povodí a délky toku od těžiště povodí k závěrovému profilu povodí.

Název analýz je shodný s nabídkou menu HEC-GeoHMS, v závorkách jsou uvedeny názvy defaultních vrstev a NÁZEV SLOUPCE v atributové tabulce při odvozování parametrů pomocí HEC-GeoHMS).

River Length - výpočet délky říčních úseků z liniové vrstvy pomocí zápisu geometrického atributu do tabulky (vrstva River, sloupec RIV_LENGTH)

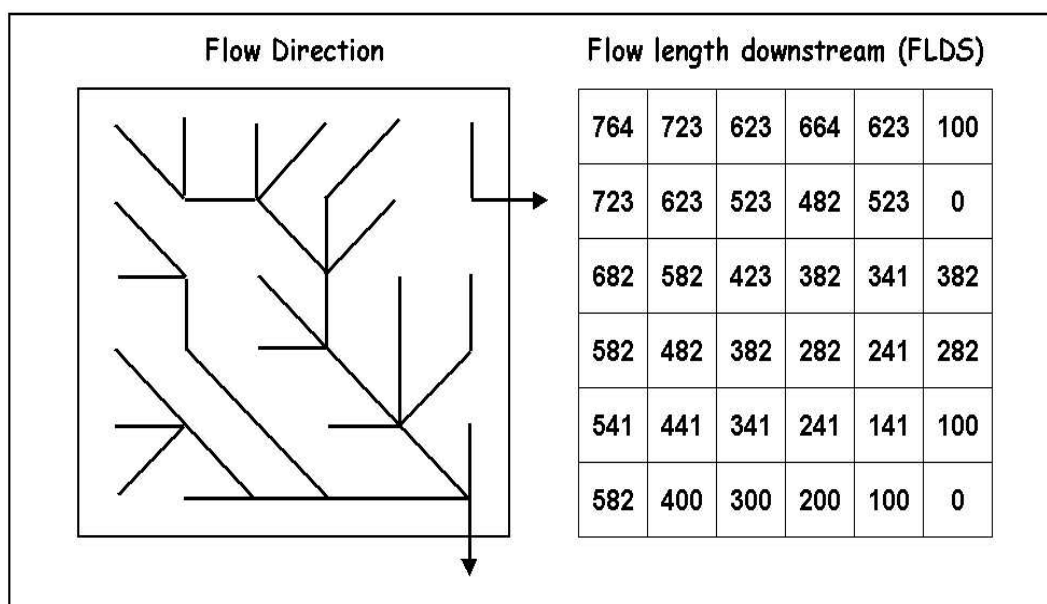
River Slope - výpočet sklonů říčních úseků na základě odečtení výšky počátečního a koncového bodu linie úseku toku a délky úseku z analýzy River Length. (vrstva River, výška počátečního bodu je uložena ve sloupci US_ELV, výška koncového bodu ve sloupci DS_ELV, výpočet sklonu je uložen ve sloupci SLP_ENDPT).

$$SLP_ENDPT = \frac{US_ELV - DS_ELV}{RIV_LENGTH} \quad [5.2]$$

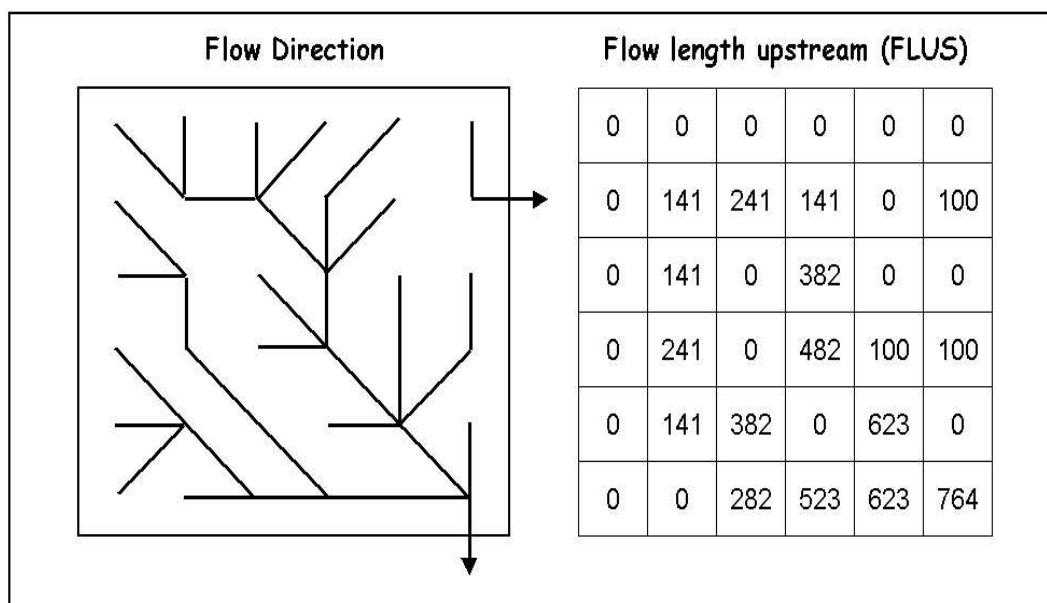
Při spuštění analýzy je vyžadováno zadání výškových jednotek vstupního DMT.

Longest Flow Path – tato operace vypočítá více parametrů povodí - délku nejdelší odtokové linie v subpovodí tj. nejdelší údolnici, výšku jejího počátečního a koncového bodu, celkový sklon a sklon mezi 10% a 80% délky nejdelší údolnice (vytvoří vrstvu LongestFP a přepíše v atributové tabulce Watershd sloupce LongestFL, USElv, DSElv, Slp_EndPt, Slp_1085).

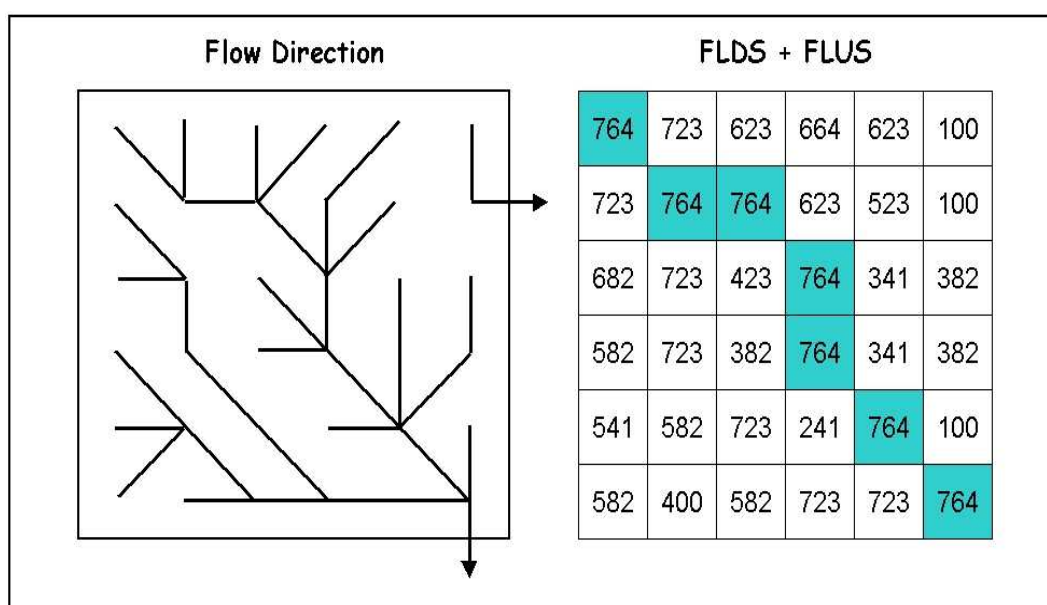
Princip určení linie nejdelší údolnice vychází z analýzy povrchu rastrového DMT. Na základě funkce Flow direction je k jednotlivým buňkám spočítána vzdálenost k závěrovému profilu daného subpovodí (Flow Length Downstream, FLDS) a poté k rozvodnici (Flow Length Upstream, FLUS). Po sečtení těchto dvou rastrů jsou buňky s nejvyšší hodnotou v subpovodí identifikovány jako Longest Flow Path a následně vektorizovány. Princip je zobrazen na Obr. 38 až Obr. 40. (Olivera, 2009)



Obr. 38. Princip odvození nejdelší údolnice. Krok 1 – výpočet vzdálenosti k závěrovému profilu daného subpovodí. (Olivera 2009)



Obr. 39. Princip odvození nejdelší údolnice. Krok 2 – výpočet vzdálenosti k rozvodnici daného subpovodí. (Olivera 2009)



Obr. 40. Princip odvození nejdelší údolnice. Krok 3 – součet vzdáleností k závěrovému profilu (FLDS) a k rozvodnici (FLUS) daného subpovodí a identifikace linie s nejvyšší hodnotou součtu. (Olivera 2009)

Basin Centroid - Pro semidistribovaný model povodí je nutno nahradit jednotlivá subpovodí bodem, který následně reprezentuje celé subpovodí a tvoří vstupní uzel orientovaného grafu.

Poloha tohoto bodu je odvozována jako střední bod subpovodí, přičemž je u HEC-GeoHMS možno použít různých metod:

- Center of gravity Method – centroid je počítán jako průnik tížnic subpovodí. Pokud je poloha centroidu určena mimo plochu povodí, je centroid přichycen k nejbližšímu místu na hranici subpovodí.
- Longest Flow Path Method – centroid je umístěn do středu linie Longest Flow Path.
- 50% Area Method – centroid je určen jako bod, do kterého se stéká voda z 50% plochy povodí (na základě Flow Accumulation).
- Centroid specifikovaný uživatelem – možnost ruční úpravy polohy centroidu v případě nevhodného určení polohy předchozími metodami.
- Bounding Box Method (ve verzi GeoHMS 1.x) – metoda aproximuje tvar povodí na pravoúhlý čtyřúhelník (dle hodnot rozsahu souřadnic subpovodí) a centroid je umístěn do jeho středu.
- Ellipse Method – centroid je umístěn jako střed elipsy opsané subpovodí (tato metoda je použitelná pouze pro subpovodí větší než 2 miliony buněk). (Fleming, Doan 2009)

Centroidy jsou ukládány do samostatné bodové vrstvy (defaultně „WshdCentroid“).

Centroidal Flow Path – tato operace vypočte délku toku od pravoúhlého průmětu centroidu na Longest Flow Path. Je vytvořena nová vrstva „Centroidalf“ a délka této linie je také zapsána do atributové tabulky vrstvy „watershed“ jako sloupec CENTROIDAL.

Charakteristiky z DEM – tuto skupinu parametrů je možné hromadně odvodit při použití extenze GeoHMS_AddIn nebo jednotlivě odvozovat příslušnými nástroji GIS.

BASINAREA – plocha subpovodí v km²

PERIMETER – obvod subpovodí v m, tj. délka rozvodnice povodí

CENTROIDX – souřadnice X těžiště povodí

CENTROIDY – souřadnice Y těžiště povodí (souřadnice těžiště lze převzít z výsledků extenze „HEC-GeoHMS“, pokud jsou k dispozici)

MEANELEV – průměrná nadmořská výška subpovodí v m n.m.

BASINSLOP – sklon subpovodí (poměrné číslo)

MFDIST – maximální délka toku v povodí v m

MFDSLOPE – průměrný sklon povodí podél maximální délky toku (poměrné číslo)

CENTOUT - délka toku z profilu průmětu těžiště subpovodí na hlavní tok k závěrovému profilu subpovodí v m (hodnota je převzata z výsledků extenze „HEC-GeoHMS“, pokud jsou k dispozici)

SLCENTOUT - průměrný sklon subpovodí podél toku z profilu průmětu těžiště povodí na hlavní tok k závěrovému profilu subpovodí (poměrné číslo). (Šercl, 2004)

8.3 Odvození parametrů krajinné sféry

Pro parametrizaci vlastností krajinné sféry byla použita metoda SCS-CN (kapitola 7.1.3). V České republice na rozdíl od USA, odkud pochází použitá metodika, neexistují mapy hydrologických skupin půd (HSP). Proto bylo nutné zjistit potřebné informace o vlastnostech půd z dostupných zdrojů.

K určení vlastností zemědělských půd byly použity mapy bonitovaných půdně ekologických jednotek (BPEJ) v měřítku 1 : 10 000. Aktuální data BPEJ v digitální formě ve formátu shapefile poskytuje Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v.v.i. Informace o lesních půdách byly zjištěny pomocí typologických map v měřítku 1 : 10 000, které poskytuje Ústav pro hospodářskou úpravu lesů Brandýs nad Labem (ÚHÚL) taktéž v digitální podobě. Úpravou a sloučením vrstev typologických map pro lesní půdu a BPEJ pro zemědělskou půdu byla stanovena hydrologická skupina půd pro celé povodí Lubiny. Dále byly použity mapy půd v měřítku 1 : 50 000, které jsou dostupné na Agentuře ochrany přírody a krajiny ČR (AOPK ČR). Tyto mapy jsou pouze v rastrové podobě a bylo nutno je zpracovat vektorizací. Z AOPK ČR byla také získána data o krajinné pokrývce, konkrétně mapová vrstva CORINE Land Cover z roku 2000 v měřítku 1 : 100 000.

8.3.1 Odvození HSP pro zemědělské půdy

Mapová vrstva bonitovaných půdně ekologických jednotek v měřítku 1 : 10 000 identifikuje jednotlivé areály pětímístným kódem BPEJ. Pro určení HSP je podstatná *hlavní půdní jednotka* (HPJ), která definuje půdní typ, druh a vodní režim. HPJ je určena druhou a třetí pozicí kódu BPEJ. Atributovými operacemi v prostředí ArcMap byla mapová vrstva BPEJ s využitím převodní tabulky (Hrádek, Kuřík 2004, Svobodová 2008) upravena na vrstvu HPJ (Tab. 6).

Tab. 6. Určení hydrologické skupiny půd pomocí HPJ (Hrádek, Kuřík 2004)

HP J	Půdní subtyp	Substrát	HSP
01	ČMn, ČMk (ČM, ČMk)	spraš	B
02	ČMi (ČMd)	spraš	B
03	ČMč (ČMI)	spraš, spraš-slín	B (C)
04	ČMr (ČM)	lehké substráty	A
05	CM	spraš / písek	B
06	ČMp, ČMpc (ČM)	slín (vylehčený Ap)	C – D
07	ČMp, ČMpc, SMn, (ČM, ČMsm)	slín, slínitý jíl	D
08	ČM, HM	smyté sprašové mat.(slín)	B (C)
09	SMm (ČMi)	spraš	B
10	HMm, HMč, HMg' (HM)	spraš	B
11	HMm, HMg (HM)	spraš. hlína	B
12	HMm, HMg (HM)	polygenetická hlína	B
13	HM, IP	hlína - lehký mat.	B
14	IP, HMi (g)	spraš. nebo polygenetická hlína	B
15	IP, HMi, HP-HPi(g)	polygenetická hlína	B (C)
16	IP	zahliněné (stěrko)písky	B (A)
17	IP, (IP)	písky (hlinité proplásky)	A (B)
18	RA, RAh	svahoviny vápenců, terrae	B - C
19	PR, PRh (RA, R th)	opuky, slínovce	B - C
20	PS, PSk (HP, RA)	slíny	D
21	HP, RGmPR (DA)	písky	A
22	HP, PR (HP, RA)	zahliněné (stěrko)písky	A - B

23	HPg	písek /jíl	A - B
24	HP, HPa, HPp (g)	svahoviny, flyš S-tS	B - C
25	HP, HPa (g)	svahoviny, opuky S - (tS)	B (C)
26	HP, HPa (g)	svahoviny břidlic S - (TS)	B (C)
27	HP, HPa	svahoviny břidlic, drob, flyš 1S	B
28	HP (g)	svahoviny bazik S	B
29	HP, HPa (g)	svahoviny eruptiv, metamorfik 1S - S	B
30	HP,HPa (g)	svahoviny, permokarbon, 1S-L	B
31	HP, HPa	svahoviny pískovců 1S - L	A (B)
32	HP, HPa	svahoviny eruptiv, metamorfik 1S-L	A (B)
33	HP, HPa (g)	svahoviny, permokarbon, S - tS	B - C
34	HPao, RZ	svahoviny eruptiv, metamorfik	B
35	HPao, RZ	svahoviny, sediment. horniny	B (A)
36	RZ, HPao	svahoviny	B
37	mělké lehké	rozpad hornin, svahoviny	B (A)
38	mělké střední až těžké	rozpad hornin, svahoviny	C - D
39	rankry	rozpad hornin	D
40	svažité 12°	lehké až 1 S	B
41	svažité 12°	střední až těžké	C - D
42	HMg	sprašová hlína	C
43	HMig,Ipg	sprašová hlína	C
44	PG (OG)	sprašová hlína	C
45	HMg	polygenet. hlína	C
46	HMig, PG (OG)	polygenet. hlína	C
47	PG (OG)	polygenet. hlína	C
48	HPg, PG (OG)	svahoviny břidlic S	C
49	HPg, PG (OG)	svahoviny těžké, tS - T	D
50	HPg, PG (OG)	svahoviny eruptiv a metamorfik S - 1S	C
51	HPg, PG (OG)	zahliněné, štěrkopísky	C
52	PH, HPg (OG)	limnický terciér 1S	C (D)
53	PG, HPg (OG)	tercierní substrát S / T	C (D)
54	PG, HPpg (OG)	jíly	D
55	NP	lehké nivní sedimenty	A
56	NP	střední nivní sedimenty	B
57	NPp	těžké nivní sedimenty	C - D
58	NPG	střední nivní sedimenty	B - C
59	NPG	těžké nivní sedimenty	D
60	ČA (LP)	nivní, sprašové sedimenty	B

		S	
61	ČA (LP)	sliny, nivní sedimenty	C (D)
62	ČAG (LPG)	nivní sedimenty aj. S	C
63	ČAG (LPG)	sliny, nivní sedimenty	D
64 - 76		hydromorfní půdy s výjimkou zkulturněných 64 a 65 a části katén	C

Poznámky k tabulce: Ve sloupci půdního subtypu jsou uvedeny symboly nové klasifikace, v závorce se jedná o symboly map komplexního průzkumu půd. Pokud jsou u hydrologických skupin uvedeny dva symboly s pomlčkou, jedná se o rozpětí variability; při menší četnosti výskytu je alternativa uvedena v závorce. Toto rozpětí je dáno heterogenitou jednotky v zrnitosti, ulehlosti nebo ve vodním režimu. V metodice byl použit vždy první symbol.

Tab. 7. Hydrologická skupina půd pro konverzi na příslušnou hlavní půdní jednotku.

HPJ	HSP	HPJ	HSP	HPJ	HSP	HPJ	HSP
13	B	28	B	43	C	56	B
18	B - C	34	B	44	C	58	B - C
20	D	35	B (A)	46	C	59	D
21	A	37	B (A)	47	C	70	C
22	A - B	38	C - D	48	C	71	C
24	B - C	40	B	49	D	73	C
27	B	41	C - D	51	C	78	C

8.3.2 Odvození HSP pro lesní půdy

Ke zjištění vlastností půd byly použity lesní typologické mapy v měřítku 1 : 10 000 znázorňující jednotlivé lesní typy. Lesní typ (LT) je základní jednotkou diferenciací růstových podmínek v typologickém systému (Plíva 1971). Definice lesního typu ÚHÚL je totožná se Zlatníkovou definicí (1956), tedy: „soubor lesních bicenóz původních i změněných a jejich vývojových stádií včetně prostředí, tedy geobiocenóz vývojově k sobě patřících“. LT je indikován význačnou druhovou kombinací rostlin příslušné fytocenózy a půdními vlastnostmi. Vyšší typologickou jednotkou je soubor lesních typů (SLT), který spojuje LT podle ekologické příbuznosti, vyjádřené hospodářsky významnými vlastnostmi stanoviště. SLT jsou vymezeny edafickými (půdními) kategoriemi a lesními vegetačními stupni. Ze získaných typologických map byly tedy nejprve v prostředí ArcMap jednotlivé areály lesních typů sloučeny do souborů lesních typů (SLT).

Typologický klasifikační systém ÚHÚL je založený na podobných principech jako systém geobiocenologický. Zlatník (1970) rozšířil původní pojetí lesního typu na celou krajinu a takto rozšířenou jednotku nazval typ geobiocenu, který definoval jako „soubor geobiocenózy přírodní a všech od ní vývojově pocházejících a do různého stupně změněných geobiocenóz (geobiocenoidů) včetně vývojových stádií“. Vyšší typologickou jednotkou, analogickou SLT, je skupina typů geobiocénů (STG). Jedná se o sdružené typy geobiocénů s podobnými trvalými ekologickými podmínkami, zjišťovanými pomocí bioindikace rostlinnými společenstvy. Nadstavbovými jednotkami geobiocenologické typizace jsou ekologické řady a vegetační stupně. Ekologické řady vyjadřují podmínky

dané obsahem živin a aciditou půd (trofické řady) a dynamikou vlhkostního režimu půd (hydrické řady). (Löw et al. 1995)

Vymezené SLT byly převedeny na STG pomocí rámcového převodního klíče. (Löw et al. 1995). Vlastnosti půd byly následně zjištěny s použitím charakteristiky jednotlivých STG (Buček, Lacina 1999). Další možností ke stanovení vlastností lesních půd je použití přímo charakteristiky daných SLT (Průša, 2001, Svobodová 2008). Přiřazením zjištěných informací o půdách jednotlivých SLT do skupiny A až D (Tab. 8, Tab. 9) byla vytvořena výsledná vrstva HSP pro lesní půdu.

Tab. 8. Hydrologické skupiny půd (Hrádek, Kuřík 2004, Janeček 2002, Kulhavý, Kovář 2000, Maidment 1993).

Charakteristika hydrologických vlastností	Skupina
Půdy s vysokou rychlostí infiltrace ($> 0,12 \text{ mm.min}^{-1}$) i při úplném nasycení, zahrnující převážně hluboké, dobře až nadměrně odvodněné písky nebo štěrky; půdy s velkou zrnitostí; $K_s > 1,1 \text{ m.den}^{-1}$	A
Půdy se střední rychlostí infiltrace ($0,06 - 0,12 \text{ mm.min}^{-1}$) i při úplném nasycení, zahrnující převážně půdy středně hluboké až hluboké, středně až dobře odvodněné, hlinitopísčité až jílovitohlinité; půdy se střední zrnitostí; $0,45 < K_s < 1,1 \text{ m.den}^{-1}$	B
Půdy s nízkou rychlostí infiltrace ($0,02 - 0,06 \text{ mm.min}^{-1}$) i při úplném nasycení, zahrnující převážně půdy s málo propustnou vrstvou v půdním profilu a půdy jílovitohlinité až jílovité; půdy s jemnou zrnitostí; $0,24 < K_s < 0,45 \text{ m.den}^{-1}$	C
Půdy s velmi nízkou rychlostí infiltrace ($< 0,02 \text{ mm.min}^{-1}$) i při úplném nasycení, zahrnující převážně jíly s vysokou bobtnavostí, půdy s trvale vysokou hladinou podzemní vody, půdy s vrstvou jílu na povrchu nebo těsně pod ním a mělké půdy nad téměř nepropustným podložím; půdy s velmi jemnou zrnitostí; $K_s < 0,24 \text{ m.den}^{-1}$	D

Tab. 9. Hydrologická skupina půd pro příslušný soubor lesních typů

SLT	HSP	SLT	HSP	SLT	HSP	SLT	HSP
1L	C	4A	B (A)	4Y	A	6B	B
2L	B - C	4B	B	4Z	D	6F	B
3A	B (A)	4C	A	5A	A (B)	6H	B
3B	B	4D	B	5B	B	6K	B
3C	A - B	4F	B	5D	B (C)	6L	D
3D	B (A)	4H	B (C)	5F	B (A)	6N	B (A)
3H	B	4K	B	5J	A - B	6S	B
3J	A (B)	4M	B (A)	5K	B	6V	C
3L	C (B)	4N	B (A)	5N	B (A)	6Z	D
3O	C	4O	C (B)	5S	B	7F	B
3S	B	4P	C (B)	5U	B (C)	7N	B (A)
3U	B	4S	B	5V	B - C	7S	A - B
3V	B - C	4V	B - C	5Z	D	7V	B - C
3Z	D	4W	B	6A	B (A)	7Z	D

8.3.3 Odvození HSP z mapy půdních typů

Půdní mapa v měřítku 1 : 50 000 je dostupná v rastrové podobě na serveru AOPK. Modelové území pokrývají části tří mapových listů různého stáří, což vzhledem ke změnám v používané půdní klasifikaci, tj. označením půdních jednotek vyžaduje sjednocení názvosloví půd.

Příslušné hydrologické vlastnosti pro půdní typy popř. subtypy byly stanoveny s použitím charakteristik půd v Němeček et al. (2001), Kutílek et al. (2004) a Tomášek (2007). Využit lze také Elektronický taxonomický klasifikační systém půd ČR (Němeček 2009).

Tab. 10. Hydrologická skupina půd pro příslušný půdní typ (subtyp) – převod jednotek Půdní mapy ČR na HPJ.

Půdní typ (subtyp)	HSP	Půdní typ (subtyp)	HSP
antrozem	B	kambizem oglejená	C (B)
fluvizem	B	luvizem	C
fluvizem glejová	B - C	podzol	B
glej	C	pseudoglej	C
hnědozem	C (B)	ranker	D
kambizem	B	rendzina	B (D)
kambizem kyselá	B		

8.3.4 Zpracování dat land-use / land-cover

V práci byly použity dvě vrstvy LULC. Vrstva CORINE Land Cover byla získána od Agentury ochrany přírody a krajiny a byla použita v kombinaci s dat odvozenými z Půdní mapy ČR v měřítku 1:50 000 a 1:100 000.

Druhá vrstva vznikla vizuální interpretací leteckých snímků v měřítku 1:5 000, přičemž atributy LULC byly zpracovány dle nomenklatury Hrádek, Kuřík (2004) (Tab. 11).

8.3.5 Odvození CN

K odvození čísla odtokových křivek došlo dle Hrádek, Kuřík (2004), Maidment et al. (1993), Bedient, et al. (2007), Svobodová (2008). Stanovení hodnoty CN vychází z kombinace HSP, způsobu využití půdy a hydrologických podmínek. Výchozí vrstvou byla CORINE Land Cover, kde bylo potřeba jednotlivé kategorie land-cover převést na kategorie land-use. Některé kategorie land-cover, jako např. směsice polí, luk a trvalých kultur nebo zemědělské oblasti s přirozenou vegetací, nelze jednoznačně zařadit do určité skupiny land-use. V takovém případě dochází k určení výsledné hodnoty CN podle podílu zastoupení daných typů land-use. Způsob obdělávání byl v případě obilnin stanoven jako „vrstevnicové řádky vedené ve směru vrstevnic“. U kategorie pastviny a křoviny bylo uvažováno s pokryvem 50 – 75 %. Hydrologické podmínky byly zvoleny „dobré“, kromě kategorie lesy, kde byly použity „střední“ (Tab. 11).

Překryvnými geometricko-atributovými analýzami byly vytvořeny vrstvy CN. Jedna byla vytvořena s použitím vrstvy LULC v měřítku 1:5 000 interpretované z leteckých snímků a vrstvy HSP z map BPEJ a SLT. Druhá vrstva CN vznikla s využitím vrstvy CORINE Land Cover a vrstvy HSP získané z půdní mapy 1 : 50 000.

Tab. 11. Průměrná čísla odtokových křivek pro PVP II (upraveno podle Hrádek, Kuřík 2004)

Zemědělské oblasti (extravilán)						
Land use	Způsob obdělávání	Hydrologické podmínky	Čísla odtokových křivek (CN) pro hydrologickou skupinu půd			
			A	B	C	D
Úhor	čerstvě zkyplený	-	77	86	91	94
	Pz	Šp	76	85	90	93
	Pz	Db	74	83	88	90
Širokořádkové plodiny (okopaniny)	Př	Šp	72	81	88	91
	Př	Db	67	78	85	89
	Př + Pz	Šp	71	80	87	90
	Př + Pz	Db	64	75	82	85
	Vř	Šp	70	79	84	88
	Vř	Db	65	75	82	86
	Vř + Pz	Šp	69	78	83	87
	Vř + Pz	Db	64	74	81	85
	Vř + Pr	Šp	66	74	80	82
	Vř + Pr	Db	62	71	78	81
	Vř + Pr + Pz	Šp	65	73	79	81
	Vř + Pr + Pz	Db	61	70	77	80
Úzkořádkové plodiny (obilniny)	Př + Pz	Db	60	72	80	84
	Vř	Šp	63	74	82	85
	Vř	Db	61	73	81	84
	Vř + Pz	Šp	62	73	81	84
	Vř + Pz	Db	60	72	80	83
	Vř + Pr	Šp	61	72	79	82
	Vř + Pr	Db	59	70	78	81
	Vř + Pr + Pz	Šp	60	71	78	81
	Vř + Pr + Pz	Db	58	69	77	81
Víceleté píceřniny, luštěřniny	Př	Šp	66	77	85	89
	Př	Db	58	72	81	85
	Vř	Šp	64	75	83	85
	Vř	Db	55	69	78	83
	Vř + Pz	Šp	63	73	80	83
	Vř + Pz	Db	51	67	76	80
Pastviny s pokryvem	< 50 %	-	68	79	86	89
	50 - 75 %	-	49	69	79	84
	> 75 %	-	39	61	74	80
Louky		-	30	58	71	78
Křoviny s pokryvem	< 50 %	-	48	67	77	83
	50 - 75 %	-	35	56	70	77
	> 75 %	-	30	48	65	73
Sady se zatravněným meziřadím		Šp	57	73	82	86
		Sř	43	65	76	82
		Db	32	58	72	79
Lesy		Šp	45	66	77	83

		Stř	36	60	73	79
		Db	30	55	70	77
Městské oblasti (intravilán)						
Využití půdy	Průměrné % nepropustných ploch	Číslo odtokových křivek (CN) pro hydrologickou skupinu půd				
		A	B	C	D	
Zemědělské dvory		59	74	82	86	
Průmyslové areály	72	81	88	91	93	
Obchodní areály	85	89	92	94	95	
Sídlní zástavba	65	77	85	90	92	
	30	57	72	81	86	
	12	46	65	77	82	
Komunikace s přikopy	dlážděné, živičné	83	89	92	93	
	makadamové, šterkové	76	85	89	91	
	nezpevněné, hlíněné	72	82	87	89	
Nepropustné plochy		98	98	98	98	

Vysvětlivky k tabulce:

Pz – posklizňové zbytky nejméně na 5 % povrchu po celý rok

Př – přímé řádky vedené bez ohledu na sklon pozemku (tedy i po spádnici)

Vř – vrstevnicové řádky vedené přesně ve směru vrstevnic (konturově)

Pr – pásové pěstované plodiny a příčné průlehované pozemky

Šp – špatné hydrologické podmínky omezující infiltraci vody do půdy a zvyšující odtok

Db – dobré hydrologické podmínky zvyšující infiltraci vody do půdy a snižující odtok

Stř – střední hydrologické podmínky

Charakteristika skupin využití půdy:

Úhor – pole bez vegetace

Pastviny – silně spásané (pokryv < 50 %), středně spásané (50 – 75 %) a málo spásané (pokryv > 75 %).

Louky – uvedené hodnoty CN se doporučují pro louky trvale nezamokřené (odvodněné); pro silně zamokřené se doporučuje použití hodnoty blízké CN = 100

Širokořádkové plodiny – plodiny seté nebo sázené do širokých řádků (okopaniny, kukuřice, zelenina, ovocné výsadby, vinice, chmelnice)

Úzkořádkové plodiny – plodiny seté v úzkých řádcích (obilniny, luskoviny, píce)

8.3.6 Odvození průměrné CN pro subpovodí

V dalším kroku je nutno přiřadit parametr CN k jednotlivým subpovodím pro výpočet efektivní srážky dle metody SCS CN. Hodnota CN může teoreticky nabývat hodnot od 0 do 100, při hodnotě 100 jsou nulové ztráty na odtoku, naopak hodnota 0 znamená, že efektivní srážky jsou rovné 0 (ze srážek nic neodtéká).

V případě semidistribovaného modelu dochází pomocí funkce zonální statistika k výpočtu průměrné hodnoty CN pro každé subpovodí, v případě použití distribuovaného modelu je možné použít gridové hodnoty.

V případě použití extenze HEC-GeoHMS-AddIn (Šercl 2004), jsou kromě průměrné hodnoty CN (sloupec „CN“) vypočteny následující položky do atributové tabulky vrstvy subpovodí:

- RTIMP – procento nepropustných ploch (je naplněno 0, může se později upřesnit, či vypočítat z gridu reprezentujícího podíl nepropustných ploch),
- I_LOSS – počáteční ztráta na odtoku v mm, je závislá na hodnotě CN a naplněna v atributové tabulce dle vztahu: (Šercl 2004)

$$I_LOSS = \frac{(25400 - (254 * CN))}{CN} * 0.2 \quad [5.3]$$

8.3.7 Výpočet doby koncentrace

Doba koncentrace (Time of Concentration - TC) je čas, za který částice vody doteče z nejvzdálenějšího místa povodí do závěrového profilu povodí. Jedná se o jednu z nejdůležitějších charakteristik povodí, neboť významně určuje např. tvar povodňové vlny, a to zejména rychlost nástupu povodňové vlny a nepřímo i velikost kulminace.

Další parametr - TLAG je čas, který uplyne od vypadnutí centra příčné srážky (zpravidla nejvyšší pořadnice hyetogramu, tj. maximální intenzity) na povodí do okamžiku výskytu kulminačního průtoku v závěrovém profilu povodí. TLAG je důležitým parametrem jednotkového hydrogramu (Unit hydrograph). (dle Šercl 2004)

Ve světě (zejména v USA) byla odvozena řada empirických vzorců pro výpočet TC a TLAG, které využívají fyzicko-geografických charakteristik povodí. Při použití extenze HEC-GeoHMS-AddIn je v menu „Výpočet doby koncentrace“ je implicitně využit vzorec SCS (Soil Conservation Service) pro výpočet TLAG.

$$TLAG = L^{0.8} * \frac{(S + 1)^{0.7}}{1900 * \sqrt{Y}}, \text{ kde:} \quad [5.4]$$

L ...maximální délka toku v povodí ve stopách (feet)

S ...maximální retence povodí v palcích (inches), definovaná jako $(1000 / CN) - 10$

Y...sklon povodí v %

Mezi TC a TLAG potom je uplatněn vztah:

$$TLAG = 0.6 * TC \quad [5.5]$$

Jednotkový hydrogram Clarkův (Clark's Unit Hydrograph) využívá ještě parametru R (tzv. storage coefficient), který představuje dobu zdržení vody v povodí. Pro tento parametr existuje omezený počet empirických vzorců, lze použít výpočet dle následujícího vztahu:

$$R = n * TC \quad [5.6]$$

Nově je implementován vzorec pro výpočet R ve tvaru:

$$R = A * L^B * S_{1085}^C, \text{ kde} \quad [5.7]$$

Lje maximální délka toku v povodí v mílích [mi],

S_{1085} je průměrný sklon povodí podél maximální délky toku ve stopách na míli v úseku mezi 10-85% délky,

A, B, C..jsou parametry rovnice odvozené pro stát Illinois v USA, které pro podmínky ČR byly upraveny na hodnoty $A = 80$, $B = 0.342$, $C = -0.79$

V atributové tabulce subpovodí watershd.shp jsou po použití menu „Výpočet doby koncentrace“ extenze HEC-GeoHMS-AddIn vytvořeny a doplněny tyto položky:

TC – doba koncentrace v hodinách - výpočet dle rovnice [5.4] a následně [5.5]

TLAG – doba v hodinách od okamžiku výskytu maximální intenzity srážky po okamžik výskytu kulminačního průtoku

RC – doba zdržení vody v povodí (storage coefficient) v hodinách – výpočet dle vztahu [5.7]

Kromě metody SCS extenze umožňuje pro vybrané povodí vypočítat novou hodnotu doby koncentrace a koeficientu R pomocí několika dalších vzorců, jejichž uplatnění je vždy omezeno, a to v závislosti na odvozených fyzicko-geografických charakteristikách povodí (plocha povodí, sklon povodí). (Šercl 2004)

Metoda Fort Bend County uplatňuje pro výpočet TC a RC tyto vztahy:

$$TC = 48.64 \frac{\left(\frac{L}{\sqrt{S}}\right)^{0.57}}{S_0^{0.11} 10^I} \log S_0 \quad [5.8]$$

$$RC = 128 \frac{\left(\frac{L}{\sqrt{S}}\right)^{0.57}}{S_0^{0.11} 10^I} \log S_0 - TC \text{ kde:} \quad [5.9]$$

Lmaximální délka toku v povodí v mílech (mi)

Sprůměrný sklon povodí podél maximální délky toku ve stopách na míli (ft/mi)

S₀ ..průměrný sklon povodí ve stopách na míli (ft/mi)

Ipodíl nepropustných ploch jako poměrné číslo

Použití vzorce má toto omezení:

- a) plocha povodí: 0.34 - 1036 km²
- b) maximální délka toku v povodí: 805 - 88500 m
- c) sklon povodí podél maximální délky toku: 0.00041 - 0.00625 m.m⁻¹
- d) sklon povodí: 0.00057 do 0.01515 m.m⁻¹

Metoda Colorado State byla odvozena pro povodí s vyšším podílem nepropustných ploch (nad 10%):

$$TLAG = C_t * (L * L_{ca})^{0.3}, \text{ kde} \quad [5.10]$$

$$C_t = \frac{7.81}{I_a^{0.78}}$$

Lmaximální délka toku v povodí v mílech (mi)

L_{ca}...délka toku z profilu průmětu těžiště povodí na hlavní tok k závěrovému profilu povodí v mílech (mi)

I_a.....podíl nepropustných ploch v %

Rovnice Kirpich byla odvozena pro malá zemědělská povodí (< 50 km²):

$$TC = m * \frac{0.00013 * L^{0.77}}{S^{0.385}}, \text{ kde:} \quad [5.11]$$

Lmaximální délka toku v povodí ve stopách (ft)
 Sprůměrný sklon povodí podél maximální délky toku ve stopách na stopu (ft/ft)
 m = 0.4....pro povodí s větším podílem urbanizovaných ploch
 m = 2.....pro povodí s větším podílem zalesněných a zatravněných ploch
 m = 1.....pro zemědělská povodí

Pro povodí s hodnotou CN < 80 je zavedena korekce:

$$TC = TC * (1 + (80 - CN) * 0.04) \quad [5.12]$$

Rovnice metody Tulsa má následující tvar:

$$TLAG = C_t * \left(\frac{L * L_{ca}}{\sqrt{S}} \right)^{0.39}, \text{ kde:} \quad [5.13]$$

$C_t = 1.42$...pro přirozená povodí

$C_t = 0.92$...pro povodí s 50% urbanizace

$C_t = 0.59$...pro povodí se 100% urbanizace

Lmaximální délka toku v povodí v mílech (mi)

L_{ca}délka toku z profilu průmětu těžiště povodí na hlavní tok k závěrovému profilu povodí v mílech (mi)

Sprůměrný sklon povodí podél maximální délky toku ve stopách na míli (ft/mi)

Použití vzorce má toto omezení:

a) plocha povodí: 1.3 - 1290 km²

b) maximální délka toku v povodí: 1610 - 125000 m

c) délka toku k těžišti povodí (basin centroid): 1610 - 96000 m

d) sklon povodí podél maximální délky toku: 0.00075 - 0.0170 m.m⁻¹

Rovnice metody Denver byla odvozena pro malá urbanizovaná povodí (do 5 km²) s nepřilíš velkými hodnotami sklonů terénu:

$$TLAG = C_t * \left(\frac{L * L_{ca}}{\sqrt{S}} \right)^{0.48}, \text{ kde:} \quad [5.14]$$

L maximální délka toku v povodí v mílech (mi)

L_{ca} délka toku z profilu průmětu těžiště povodí na hlavní tok k závěrovému profilu povodí v mílech (mi)

S průměrný sklon povodí podél maximální délky toku ve stopách na stopu (ft/ft)

C_t koeficient závislý na podílu nepropustných ploch I_a :

$$C_t = -0.00371 * I_a + 0.163 \quad \text{pro } 0 \leq I_a \leq 10$$

$$C_t = 0.000023 * I_a^2 - 0.002241 * I_a + 0.146 \quad \text{pro } 10 < I_a \leq 40$$

$$C_t = 0.0000033 * I_a^2 - 0.000801 * I_a + 0.12 \quad \text{pro } 40 < I_a \leq 100$$

Po výpočtu hodnoty TC je obdobně nabídnut dialog se dvěma variantami pro výpočet hodnoty koeficientu R:

- Výpočet R jako „Násobek TC“ předpokládá využití vztahu [5.6] a uživatel je posléze vyzván k zadání násobného koeficientu, kdy je doporučováno rozmezí hodnot 0.7 - 2 v závislosti na morfologických charakteristikách terénu, kdy povodí

s malým průměrným sklonem hlavní údolnice a malým relativním převýšením budou mít vyšší schopnost retence a tedy i vyšší hodnoty koeficientu R.

- Rovnice „Illinois Eq. - modifikovaná pro ČR“ (Šercl 2004) využívá vztah [5.7] s hodnotami koeficientů $A = 80$, $B = 0.342$, $C = -0.79$. Původní rovnice pro stát Illinois má hodnotu koeficientu $A = 16.4$ a dává příliš nízké odhady koeficientu R, pro podmínky ČR tedy není nejvhodnější (dle Šercl 2004).

8.4 Tvorba exportního souboru pro HEC-HMS

Při použití preprocessingového nástroje HEC-GeoHMS je možné vytvořit v prostředí GIS exportní soubor ve formátu ASCII, který obsahuje geometrické i negeometrické parametry modelu povodí, které byly zpracovány výše popsanými metodami v prostředí GIS. K sestavení a exportu vlastního schematického modelu se zajištěním všech potřebných topologických vazeb sloučí Menu „HMS“. Příprava exportu probíhá v následujících krocích (upraveno dle Šercl 2004):

Reach AutoName – přiřazení automaticky generovaných jmen říčním úsekům ve formátu „Rxxx“, např. R120. Jména jsou zapisována do atributové tabulky vrstvy River ve sloupci NAME.

Basin AutoName – přiřazení automaticky generovaných jmen subpovodím ve formátu „RxxxWxxx“, např. R120W120. Jména jsou zapisována do atributové tabulky vrstvy River ve sloupci NAME.

Map to HMS Units – v tomto kroku dochází k možnosti přepočtu používaných jednotek do varianty English Units nebo SI Units.

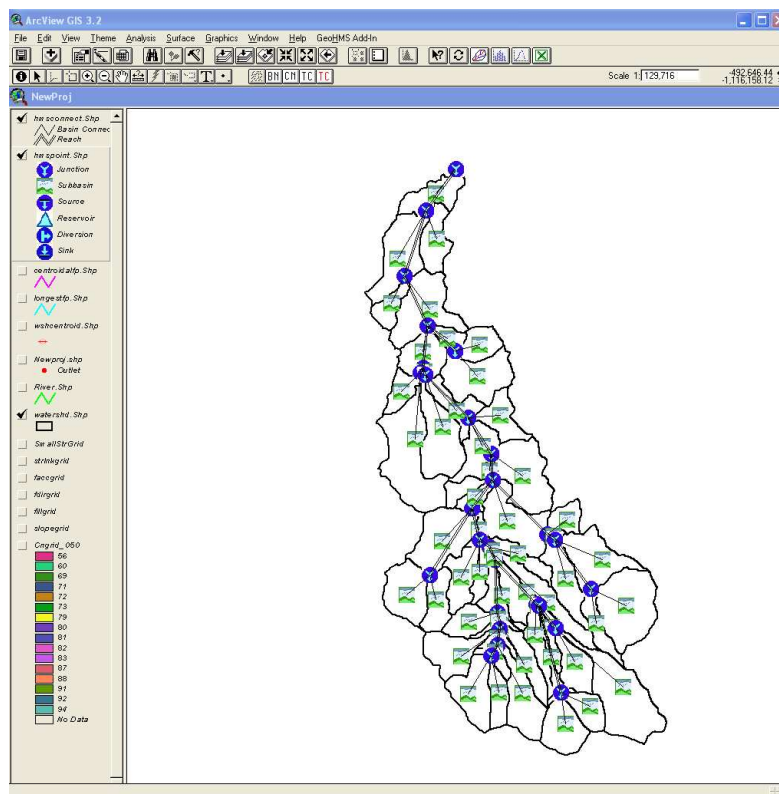
HMS Check Data – provedení kontroly topologie a jedinečnosti prvků, z nichž bude sestaven model povodí v HEC-HMS. Operace zahrnuje:

- kontrolu jedinečnosti identifikátoru a jména říčního úseku,
- kontrolu jedinečnosti identifikátoru a jména povodí,
- kontrolu topologie subpovodí a říčních úseků,
- kontrolu topologie subpovodí a centroidů,
- kontrolu topologie (konektivity) říčních úseků.

Výsledek kontroly je uložen do textového souboru SkelConsChk.txt

HMS Schematic – vytvoří schématický model, tj. geometrickou podobu orientovaného grafu povodí v podobě bodových vrstev centroidů (vrstva wshcentroid) a soutoků (vrstva hmspoint) a schematizovaných říčních úseků (vrstva hmsconnect).

HMS Legend – přiřadí vrstvám vytvořeným v předchozím kroku legendu používanou v HEC-HMS



Obr. 41. Vytvoření schematizace a legendy pro HEC-HMS v ArcView 3.2

Add Coordinates – zapíše do atributové tabulky schematických vrstev souřadnice použité pro export schématickému modelu do HEC-HMS. V případě bodových vrstev vzniknou dva sloupce s souřadnicemi X a Y (CANVASX, CANVASY). V případě liniové vrstvy říčních úseků dojde k vytvoření dvojice sloupců se souřadnicemi výchozího a konečného bodu (FROMCANVASX, FROMCANVASY a CANVASX, CANVASY).

Background Map File – v případě použití starší verze HEC-HMS je možné vytvořit exportní soubor s neschematizovanou geometrií rozvodnic a říční sítě (soubor mapfile.map), který lze použít jako podkladovou mapu v projektu HEC-HMS. V případě použití novější verze HEC-HMS 3.x není nutno tento export provádět, je možno použít přímo vrstvu subpovodí v podobě shapefile.

Distributed Basin Model – vytvoří exportní soubor schematizovaného hydrologického modelu ve formátu HEC-HMS, který je možné v případě použití extenze HEC-GeoHMS AddIn aktualizovat, tj. doplnit o parametry zvolených metod pro hydrologickou a hydraulickou transformaci. Struktur exportního souboru je následující (hlavička a část souboru pro jedno subpovodí):

Basin: Lubina

Description: Basin model created with HEC-GeoHMS Add-In v1.0

Last Modified date: 09 February 2009

Last Modified Time: 13:14:50

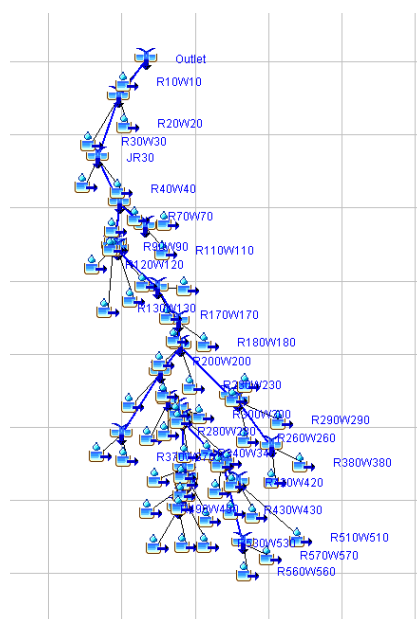
Unit System: SI Unit

End:

Subbasin: R10W10	(název subpovodí)
CanvasX: -481866.083000	(X souřadnice centroidu)
CanvasY: -1115372.275000	(Y souřadnice centroidu)
Description:	(popis, nepovinná položka)
Area: 3.066000	(plocha povodí v km ²)
Percent Impervious Area: 0.000000	(procento nepropustných ploch)
Curve Number: 75.200000	(parametr SCS-CN metody)
Initial Abstraction: 16.800000	(počáteční ztráta v mm)
Time of Concentration: 3.300000	(čas koncentrace TC)
Storage Coefficient: 8.830000	(koeficient zdržení R)
LossRate: SCS	(metoda stanovení efektivní srážky)
Transform: Clark	(metoda hydrol. transformace)
Label X: 16	(pozice popisku)
Label Y: 0	
Downstream: Outlet	(navazující prvek schematizace)
End:	

8.5 Import a doplnění parametrů modelu povodí v HEC-HMS

Vytvořený exportní ASCII soubor (*.basin) je možné načíst do hydrologického modelovacího systému HEC-HMS, kde na základě načtených souřadnic jednotlivých elementů a jejich konektivity vytvoří schematický model povodí - Basin model (Obr. 42). Vytvořený model není kompletní - je nutno specifikovat vybrané metody pro jednotlivé komponenty odtokového procesu a v případě nutnosti (pokud nebyly součástí preprocessingu) doplnit jejich parametry.



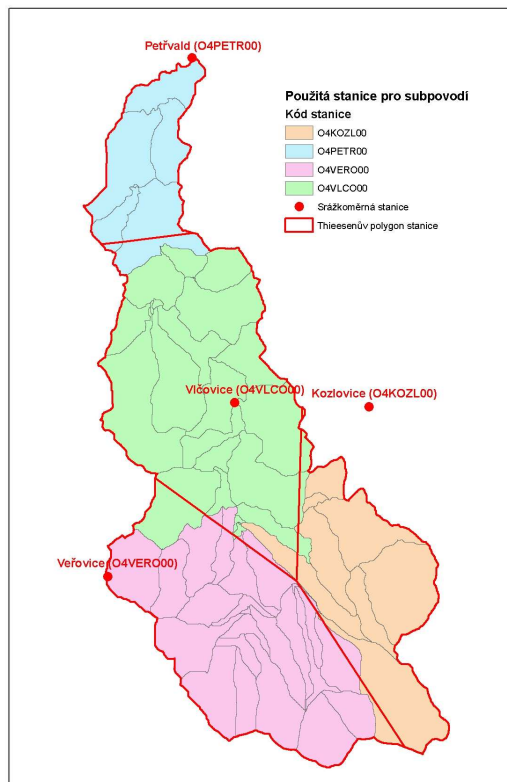
Obr. 42. Basin model povodí Lubiny v HEC-HMS vytvořený na základě importu výměnného formátu z preprocessingu v ArcGIS a HEC-GeoHMS.

8.6 Stanovení úhrnu srážek na povodí

Dalším krokem je vyřešení prostorové distribuce srážek na povodí (v HEC-HMS označovaná jako Meteorologic model), tzn. zvolení typu měření srážkových dat (srážkoměrné stanice, radarové odhady srážek) a zvolení metody jejich distribuce na jednotlivá subpovodí.

V tomto kroku je možné rovněž použít v rámci preprocessingu potenciálu GIS s možností využít nástrojů implementovaných do GeoHMS ve verzi 4.x, které umožňují tři nejpoužívanější způsoby zpracování srážkových dat:

- Zpracování radarových odhadů srážek ve formě gridu do podoby čitelné pro HEC-HMS (HEC's standard hydrologic grid - SHG).
- Přiřazení srážkoměrných stanic jednotlivým subpovodím pomocí metody Thiessenových polygonů (Gage Weights Meteorologic Model). Princip metody je v provedení překryvné operace vrstvy subpovodí a Thiessenových polygonů jednotlivých stanic. V případě, že se část subpovodí nachází na ploše více Thiessenových polygonů, rozhoduje o přiřazení k polygonu část povodí s největším podílem plochy. Tato metoda byla použita pro zpracování meteorologických modelů na povodí Lubiny (Obr. 43).
- Přiřazení srážkoměrných stanic jednotlivým subpovodím pomocí interpolace metodou IDW (Inverse Distance Meteorologic Model). Princip metody je v přiřazení srážkoměrných stanic jednotlivým subpovodím na základě vzájemné vzdálenosti. Výpočet množství srážek na povodí pak probíhá na základě vrstvy interpolované metodou IDW.



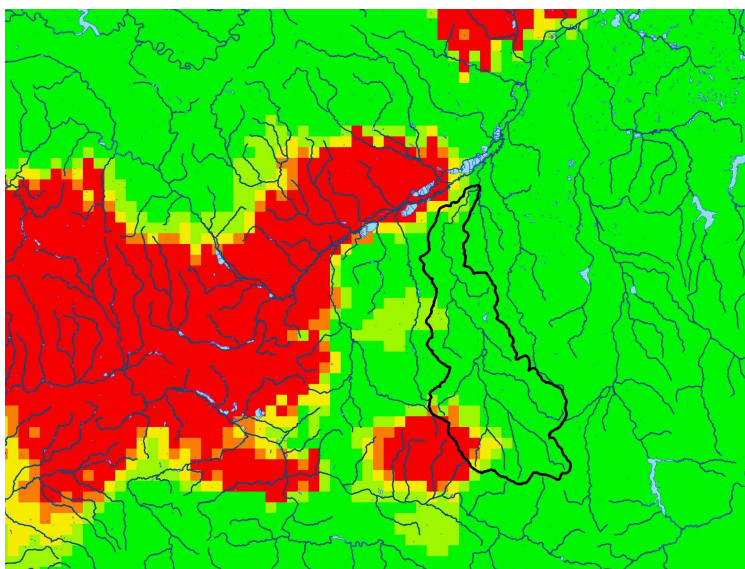
Obr. 43. Prostorová distribuce srážek na povodí Lubiny na základě metody Thiessenových polygonů (Gage Weights Meteorologic Model).

8.7 Použité srážkové epizody

Srážkoodtokové modelování proběhlo na třech srážkových epizodách - byla použita jednoduchá návrhová srážka v době trvání 24 hodin a dvě reálné srážkové epizody - z června 2009 a ze září 2007 v době trvání 14 dní.

Návrhová srážka (Hrádek, Kuřík 2004, Trupl 1958) používala jednovrcholový návrhový hyetogram (Příloha 2) a byla v rámci meteorologického modelu použita jednotně na všechna subpovodí. Tato srážka byla použita pro možnost srovnávání odezvy modelu na jednoduchý srážkový impuls. Reálná srážka byla použita pro možnost srovnání modelovaného hydrogramu s reálným měřeným hydrogramem v závěrovém profilu povodí – stanice Petřvald.

Srážková epizoda proběhla v období 15. – 28. 6. 2009 odpovídá svým charakterem přívalové srážce z konvektivní oblačnosti (Příloha 3). Zasáhla části povodí s rozdílnou intenzitou s rozdílnou časovou distribucí kulminací v různých časech povodí. Největší úhrn srážek zaznamenala část povodí pokrytá v meteorologickém modelu stanicí Kozlovice. Obraz radarových odhadů srážek (adjustovaný radar) je na Obr. 44.



Obr. 44. Rozložení srážek dle radarového odhadu v době kulminace srážkové epizody 24. 9. 2007 ve 20:00. (červeně a žlutě – zaznamenané srážky dle intenzity, černý obrys – modelové povodí). Zdroj dat ČHMÚ.

Další srážkovou epizodou použitou pro ověření chování modelu po kalibraci byla situace v období 1. – 15. 9. 2007. Tato druhá simulovaná epizoda je hydrosynopticky zcela odlišná (Příloha 4). Jednalo se zde o regionální (či stratiformní) srážky iniciované cyklonální situací setrvávající JV od území ČR. Ve dnech 4. 9. a 5. 9. 2007 se nad střední Evropou vytvořila ve vyšších vrstvách atmosféry tlaková níže a přesunula se nad Balkánský poloostrov. Frontální rozhraní spojené s touto níží začalo ovlivňovat severní Moravu od západu a postupně i Beskydy a zájmové povodí. (Unucka, Adamec 2008). Srážkové úhrny pro sledované období byly na povodí 163 mm (Petřvald), 240 mm (Vlčovice), 251 mm (Petrovice) a 287 mm (Kozlovice).

V modelovaných hydrogramech v následujících kapitolách jsou pro ilustraci průběhu srážkové epizody použity výšky srážek měřené ve stanici Petřvald.

9 Vliv výškových dat na výsledky srážkoodtokového modelování

V této části práce je řešen vliv výškových dat použitých pro stavbu digitálního modelu terénu, na jehož základě dochází k odvození odtokové sítě a dílčích subpovodí. Z nich následně vychází geometrie a hydrografické parametry semidistribuovaných modelů. Použitá výšková data mají tedy přímý vliv na geometrii a základní hydrografické parametry srážkoodtokového modelu.

9.1 Metody srovnávání dílčích výsledků

Metodika srovnávání dílčích výsledků je založena na principu porovnání modelovaných hydrogramů z jednotlivých modelů používajících různá výšková data mezi sebou navzájem a v případě použití reálné srážkové epizody také s měřeným průtokem v závěrovém profilu povodí. Je porovnáván čas a velikost kulminačního průtoky, což jsou nejvíce sledované parametry pro možnost reakce na případnou povodeň.

Dále jsou srovnávány základní statistické ukazatele hydrografických parametrů odvozených subpovodí a odtokových linií, které jsou používány pro stavbu srážkoodtokového modelu.

9.2 Schematizace modelů

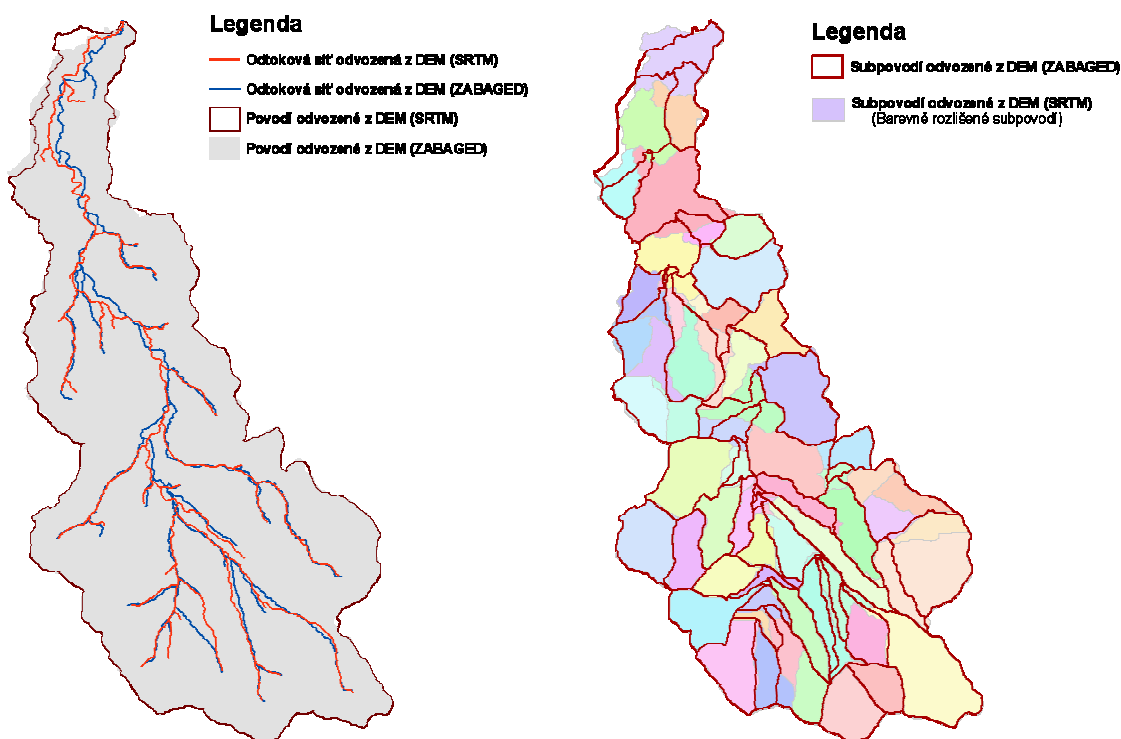
Z digitálních modelů terénu založených na datech ZABAGED a SRTM (kapitola 7.2) byla za pomoci hydrologických analýz vytvořena geometrie modelu (jednotlivá subpovodí a odtokové linie), která byla doplněna o hydrografické parametry a parametry dalších složek krajinné sféry podílejících se na hydrologické transformaci odtoku. Srovnání základních parametrů subpovodí a odtokových linií odvozených z digitálních modelů terénu je uvedeno v Tab. 12. Pro stavbu modelů v této kapitole byla použita geodatabáze CORINE Land Cover a geodatabáze odvozená z dat Půdní mapy ČR 1:100 000.

Na základě těchto schematizací byly vytvořeny dva semidistribuované srážkoodtokové modely pomocí softwarového produktu HEC-HMS (Feldman 2000) – jeden založený na parametrech odvozených z výškopisných dat ZABAGED (označovaný dále jako model ZABAGED) a druhý odvozený z dat SRTM (označovaný dále jako model SRTM). Pro oba modely byly použity stejné metody odvození údajů a stejné prahové hodnoty pro definici odtokových linií a limitní velikosti subpovodí. Také byly použity stejné vstupní vrstvy pro odvození parametrů krajinné sféry, takže výsledné modely se liší pouze geometrií, hydrografickými parametry odvozenými z DEM a parametry touto geometrickou složkou ovlivněnými.

Tab. 12. Srovnání subpovodí a odtokových linií odvozených z dat ZABAGED a SRTM.

Použitá výšková data	SRTM	ZABAGED
Odvozená povodí		
Velikost povodí	165.01 km	164.71 km
Počet subpovodí	63	57
Průměrná velikost subpovodí	2.62 km	2.13 km
Největší velikost subpovodí	8.35 km	8.85 km
Nejmenší velikost subpovodí	0.054 km	0.036 km
Průměrný sklon povodí	12.05°	13.24°
Největší průměrný sklon subpovodí	40.63°	47.38°
Nejmenší průměrný sklon povodí	2.32°	0.832°
Odvozené odtokové linie		
Průměrná délka úseku	1.65 km	1.86 km
Největší délka úseku	5.41 km	6.25 km
Nejmenší délka úseku	83.6 m	107.8 m

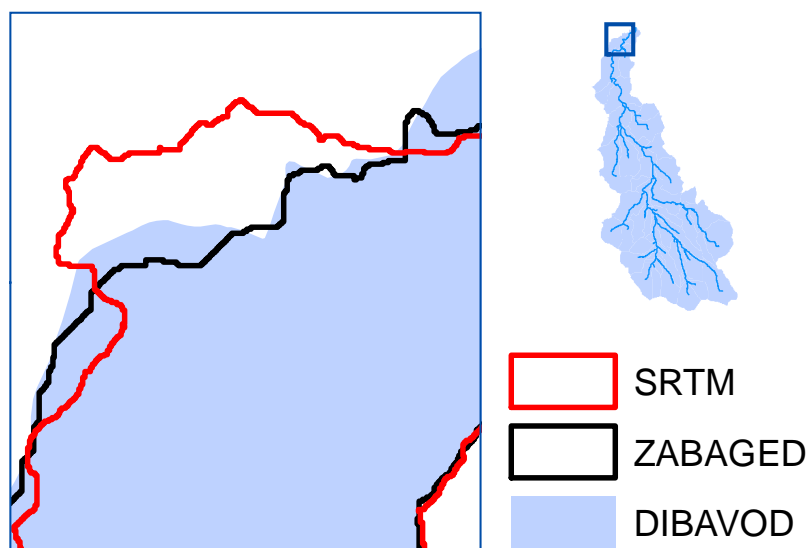
Základní geometrické atributy i průběh odtokových linií a rozvodnic vykazují relativně malé rozdíly při použití výškopisných dat SRTM a ZABAGED, přestože tato data představují krajní případy přesnosti a rozlišení, která je možné na vybraném území běžně získat.



Obr. 45. Srovnání odvozených odtokových linií a subpovodí z DEM ZABAGED a SRTM (též v Přílohách 11 a 12).

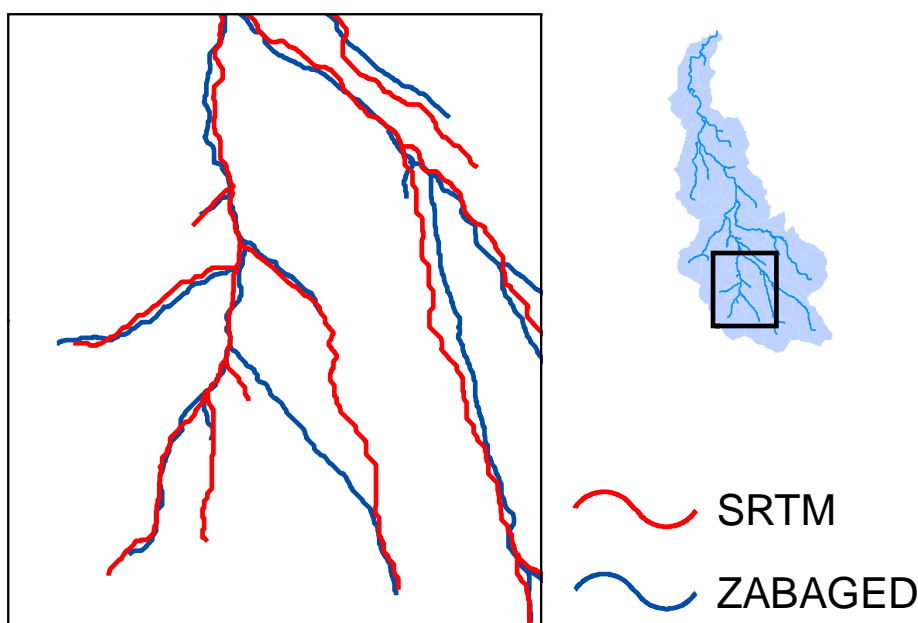
Při prostorovém srovnání jednotlivých odvozených subpovodí je patrná výrazná odlišnost modelu SRTM v pahorkatinném a nížinném reliéfu. Zatímco v horském reliéfu je odvození směrů odtoku díky velkému spádu reliéfu řešeno uspokojivě, v oblastech s nižší relativní výškovou členitostí se silně projevuje vliv nízkého prostorového rozlišení dat SRTM, jelikož odvozené směry odtoku pro jednotlivé buňky rastru neodpovídají přesnějším datům ZABAGED. Při výsledném odvození subpovodí při použití zvolené prahové hodnoty velikosti přispívající oblasti dochází ke krizi dat, kdy velikost subpovodí neodpovídá prostorovému rozlišení dat SRTM.

Generování rozvodnic celého povodí Lubiny (tj. povodí velikosti cca 160 km²) proběhlo úspěšně i z dat SRTM díky tomu, že rozvodní partie povodí leží v oblastech s velkou členitostí reliéfu. Problematickou zůstává oblast nivy Odry (severní část povodí), kde je reliéf natolik plochý, že odvozená rozvodnice z dat SRTM ani ZABAGED zde neodpovídá referenčním datům DIBAVOD (VÚV TGM, 2009). Situace je zobrazena na Obr. 46.



Obr. 46. Srovnání rozvodnice z referenčních dat DIBAVOD (VÚV TGM, 2009) s odvozenými rozvodnicemi z dat SRTM a ZABAGED v problémové oblasti dolního doku Lubiny.

Při prostorovém srovnání odvozených odtokových linií je patrné zachování základního charakteru říční sítě, jsou však viditelné odchylky modelu SRTM, který kvůli nižšímu prostorovému rozlišení není schopen podchytit detaily údolní sítě. Největší problém je viditelný ve vrcholové části povodí, kde je údolní síť charakteristická úzkými rovnoběžnými údolími. Zde došlo k případu, že hustota takových údolí byla větší než rozlišovací schopnost dat SRTM a došlo ke splnutí dvou údolí v jedno (Obr. 47).



Obr. 47. Srovnání odtokových linií odvozených z dat ZABAGED a SRTM. Oblast horního toku Lubiny, kde došlo v modelu SRTM ke splynutí dvou rovnoběžných údolí z důvodu malého prostorového rozlišení výškových dat.

9.3 Výsledky nekalibrovaných modelů SRTM a ZABAGED

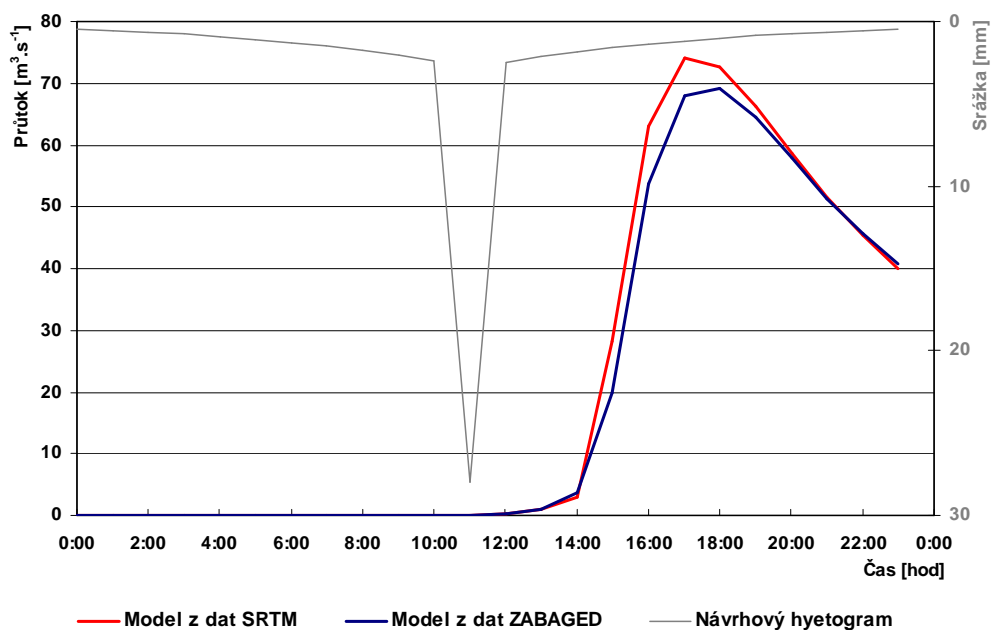
V první fázi modelování byly použity 2 srážkové epizody – návrhová srážka a konvektivní srážka v období 15. – 28. 7. 2009.

Modelované výsledky nejsou kalibrované, aby mohlo být porovnání chování modelů vytvořených z různých výškopisných dat. V obou použitých srážkových epizodách model založený na datech SRTM více nadhodnocoval kulminační průtoky, čas kulminace zůstává stejný.

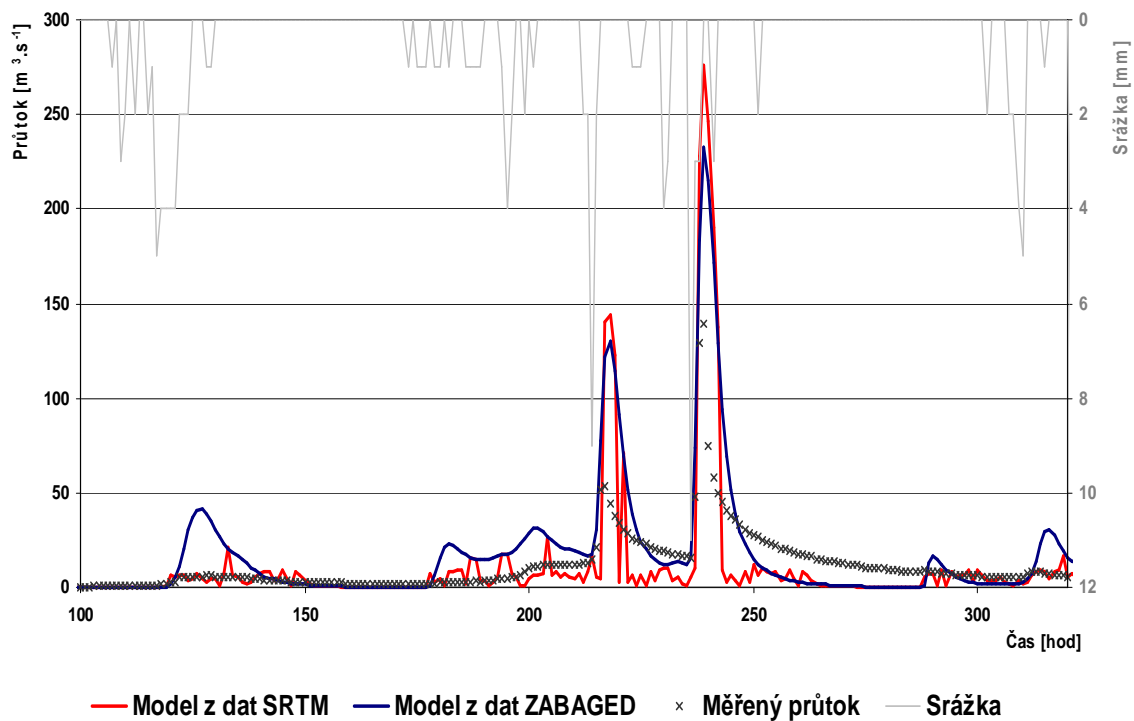
Výsledky modelování jsou uvedeny v Obr. 48 (návrhová srážka) a v Obr. 49 (reálná srážka). Tato srážky vyvolala v reálném povodí kulminační průtok $139 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, což odpovídá cca 10letému průtoku.

Tab. 13. Srovnání parametrů modelovaných hydrogramů z nekalibrovaných modelů založených na datech SRTM a ZABAGED (kulminační průtok reálné srážky - $139 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

Model - srážka	Kulminační průtok	Čas kulminačního průtoku
SRTM - návrhová sr.	$74,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	17:00
ZABAGED - návrhová sr.	$69,3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	18:00
SRTM - reálná srážka	$276 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	24. 6. 2009 23:00
ZABAGED - reálná srážka	$232 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	24. 6. 2009 23:00



Obr. 48. Modelované hydrogramy při použití 24 hodinové návrhové srážky.



Obr. 49. Modelované hydrogramy při použití reálné srážky.

9.4 Zhodnocení dílčích výsledků nekalibrovaných modelů

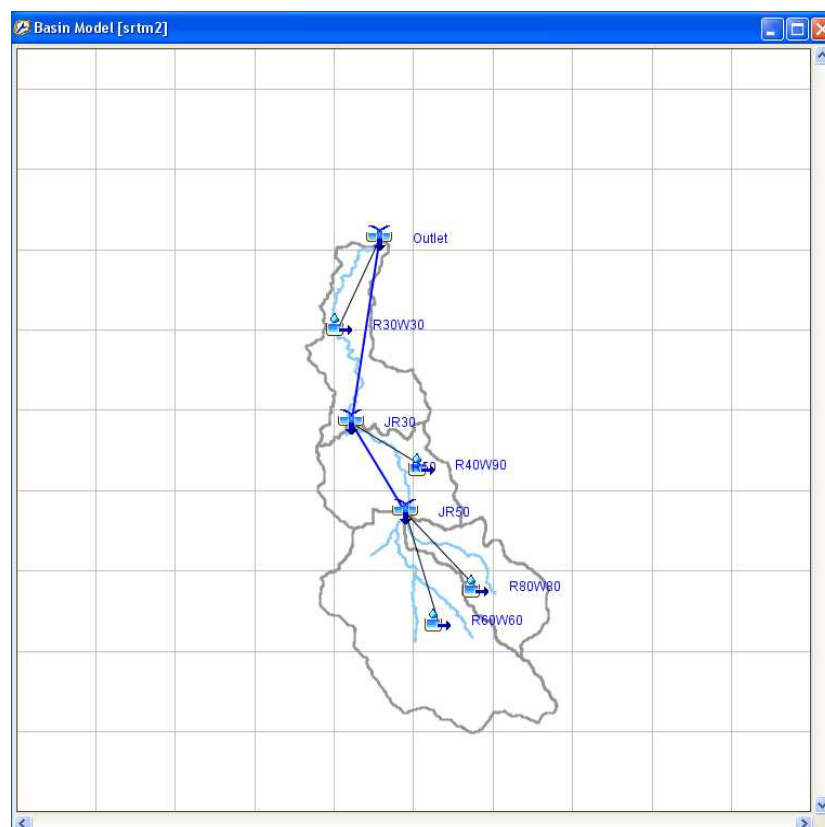
Výsledky testovaných semidistribuovaných srážkoodtokových modelů vykazují větší odlišnosti v modelovaných hydrogramech než v přímém srovnání hydrografických parametrů odtokových linií a subpovodí. Vzhledem k použití stejných podkladů pro odvození parametrů krajinné sféry je nasnadě, že jiné prostorové rozložení subpovodí a jiné délky a hydrografické parametry odvozených odtokových linií mají relativně velký vliv na průměrné hodnoty těchto parametrů přiřazovaným jak k centroidům jednotlivých subpovodí tak k odvozeným odtokovým liniím. Srovnání modelovaných hydrogramů s reálnou hodnotou kulminace ukazuje silné nadhodnocení kulminačních průtoků.

9.5 Model z dat SRTM s nižší úrovní rozlišení

Vyhodnocení výsledků srovnání srážkoodtokových modelů založených na datech SRTM a ZABAGED ukazuje na možnost příliš podrobné schematizace modelu z dat SRTM neodpovídající rozlišení samotných výškových dat (tzv. krize dat). V dalším kroku byl ověřován tento vliv. Byla provedena méně podrobná schematizace, která díky relativně korektnímu odvození rozvodnic v terénu s větší výškovou členitostí omezovala chyby vzniklé vzájemnou prostorovou disharmonií vymezení subpovodí s vrstvami nesoucími informace o parametrech krajinné sféry (tj. půdní data a LULC), byť za cenu průměrování parametrů z větší plochy povodí pro semidistribuovaný model (tento model je dále označován jako model SRTM2). Povodí bylo na základě zvolené prahové hodnoty pro přispívající plochu rozděleno do čtyř subpovodí - po jednom subpovodí pro dolní a střední tok, horní tok byl dále rozdělen do dvou subpovodí na východní a západní část (Tab. 14 a Obr. 50). Výsledná schematizace odpovídá i rozložení srážkoměrných stanic v povodí, tj. každému subpovodí odpovídá jedna stanice.

Tab. 14. Parametry subpovodí modelu z dat SRTM s menší podrobností (model SRTM2)

Název subpovodí	Plocha km ²	Průměrná nadmořská výška (m n.m.)
R30W30	34,5	281,169
R60W60	74,0	462,165
R80W80	25,2	390,468
R40W90	31,3	322,599



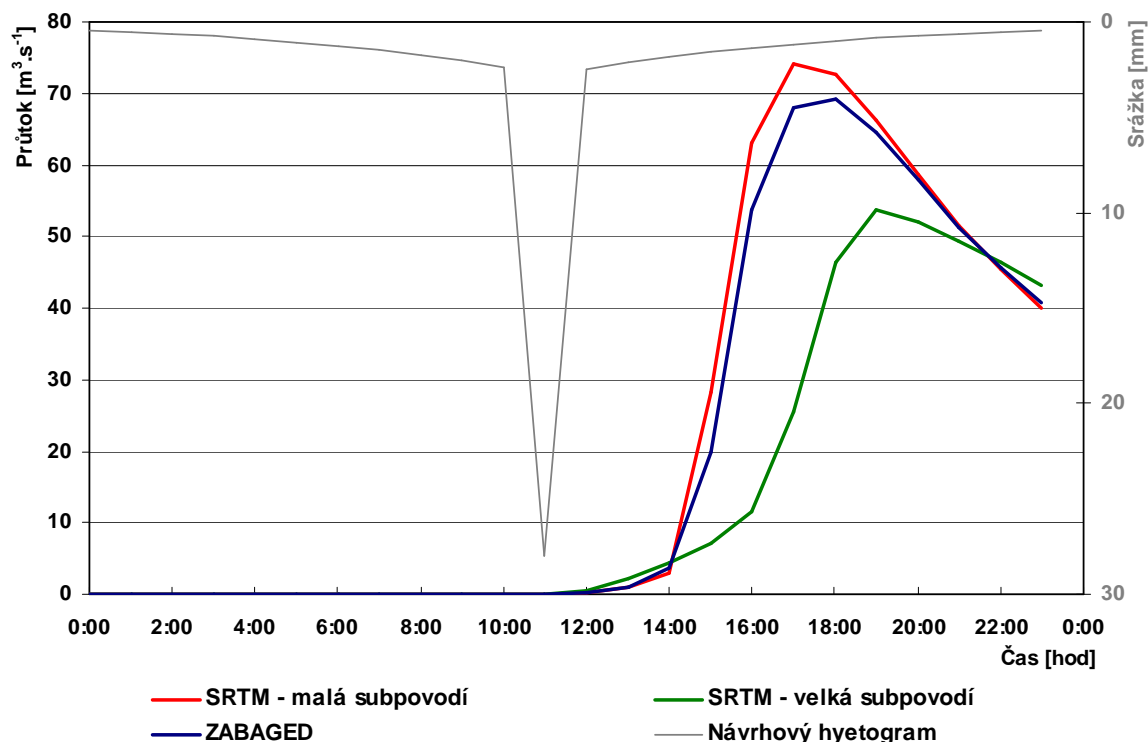
Obr. 50. Schematizace modelu z dat SRTM s menší podrobností (model SRTM2).

9.6 Srovnání modelovaných výsledků nekalibrovaného modelu SRTM2

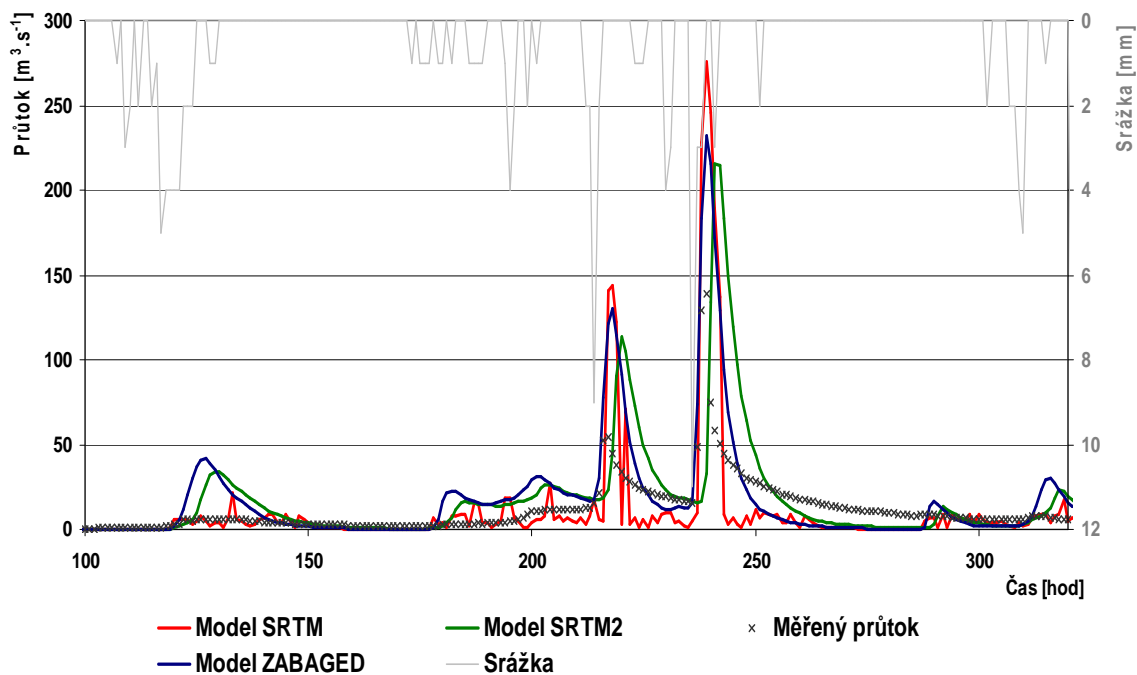
Na uvedeném modelu bylo provedeno srážkoodtokové modelování za použití návrhové 24 hodinové srážky a následně za použití reálné srážky z 15. – 28. 6. 2009. Srovnání modelovaných hydrogramů ukazuje snížení modelované hodnoty kulminačního průtoku až pod hodnotu modelu z dat ZABAGED a posun času kulminace do pozdějších hodin (Tab. 15, Obr. 51 a Obr. 52).

Tab. 15. Srovnání parametrů modelovaných hydrogramů z nekalibrovaných modelů SRTM, SRTM2 a ZABAGED (kulminační průtok reálné srážky - $139 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

Model - srážka	Kulminační průtok	Čas kulminačního průtoku
SRTM - návrhová sr.	$74,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	17:00
SRTM2 - návrhová sr.	$53,8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	19:00
ZABAGED - návrhová sr.	$69,3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	18:00
SRTM - reálná srážka	$276 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	24. 6. 2009 21:00
SRTM2 - reálná srážka	$215 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	25. 6. 2009 01:00
ZABAGED - reálná srážka	$232 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	24. 6. 2009 21:00



Obr. 51. Srovnání modelovaných hydrogramů při použití návrhové srážky. Srovnávané modely z dat SRTM s rozdílnou podrobností schematizace.



Obr. 52. Srovnání modelovaných hydrogramů při použití reálné srážky. Srovnávané modely z dat SRTM s rozdílnou podrobností schematizace.

9.7 Zhodnocení dílčích výsledků nekalibrovaného modelu SRTM2

Výsledky srovnání modelu z dat SRTM s nižší úrovní rozlišení (SRTM2) vykazují snížení hodnoty kulminačního průtoku modelovaného hydrogramu až pod hodnotu modelu z dat ZABAGED, spolu s posunem doby kulminace. Je možné označit vliv několika změn, které při snížení rozlišení modelu nastaly:

- došlo ke změně plochy subpovodí ze které se odvozuje průměrná hodnota CN, což vede ke změně hodnoty CN, která je následně použita pro výpočet efektivní srážky v celém subpovodí,
- byla odstraněna krize dat způsobená malou velikostí subpovodí v původním modelu (model označovaný SRTM) vs. malé prostorové rozlišení dat SRTM a došlo k přesnějšímu odvození rozvodnic subpovodí,
- došlo ke zmenšení celkové délky toků (neuvažováním menších přítoků), ve kterých docházelo k výpočtu hydraulické transformace pomocí metody kinematické vlnové aproximace. Rychlejší pohyb vody v těchto tocích byl nahrazen povrchovým odtokem po ploše povodí, který byl modelován metodou Clarkova jednotkového hydrogramu.

Přestože možných důvodů ke snížení modelovaného kulminačního průtoku je více, v modelovaném případě bez kalibrace se tento nejméně podrobný model nejvíce přiblížil hodnotě reálného kulminačního průtoku.

9.8 Kalibrace modelů dle ukazatele předchozích srážek

Modelované průtoky v předchozích kapitolách vypovídají o chování modelů s parametry odvozenými z podkladových dat. Ve srovnání s měřenými průtoky v závěrovém profilu povodí jsou však průtoky neúnosně nadhodnocené. Kalibrace na hodnoty měřeného hydrogramu, což je při použití srážkoodtokového modelu nejběžnější způsob, by znemožnila vzájemné srovnání modelů odvozených z jednotlivých podkladových dat, jelikož taková kalibrace zasahuje přímo do odvozovaných parametrů bez ohledu na původní data.

V práci byla proto použita kalibrace hodnot průměrných hodnot CN a hodnoty počáteční ztráty na povodí (Initial Abstraction) dle předchozích vláhových podmínek (AMC), respektive ukazatele předchozích srážek (UPS) za předchozích 5 dní. Metodika zohledňující vlhkostní stav povodí před počátkem srážkové epizody je uvedena v kapitole 7.1.3., použity byly přepočtení vztahy [4.2] pro přepočet hodnoty CN a [4.3] pro přepočet počáteční ztráty.

Pro použití v průběhu vegetačního období je doporučen přepočet hodnot CN a počáteční ztráty v případě, že UPS nepřekročí hodnotu 36 mm. Hodnoty UPS pro jednotlivé stanice jsou uvedeny v Tab. 16. Vzhledem k tomu, že hodnoty UPS nepřekročily stanovanou hranici v žádné z použitých srážkoměrných stanic, byly hodnoty CN a počáteční ztráty přepočteny ve všech subpovodích modelů.

Tab. 16. Hodnoty UPS pro jednotlivé použité srážkoměrné stanice. Zdroj dat ČHMÚ.

Srážková epizoda 15. - 28. 6. 2009				
Stanice	Petřvald	Kozlovice	Veřovice	Vlčovice
UPS [mm]	9	6	13.4	4.9

Srážková epizoda 1. - 15. 9. 2007				
Stanice	Petřvald	Kozlovice	Veřovice	Vlčovice
UPS [mm]	4	8.5*	0	0

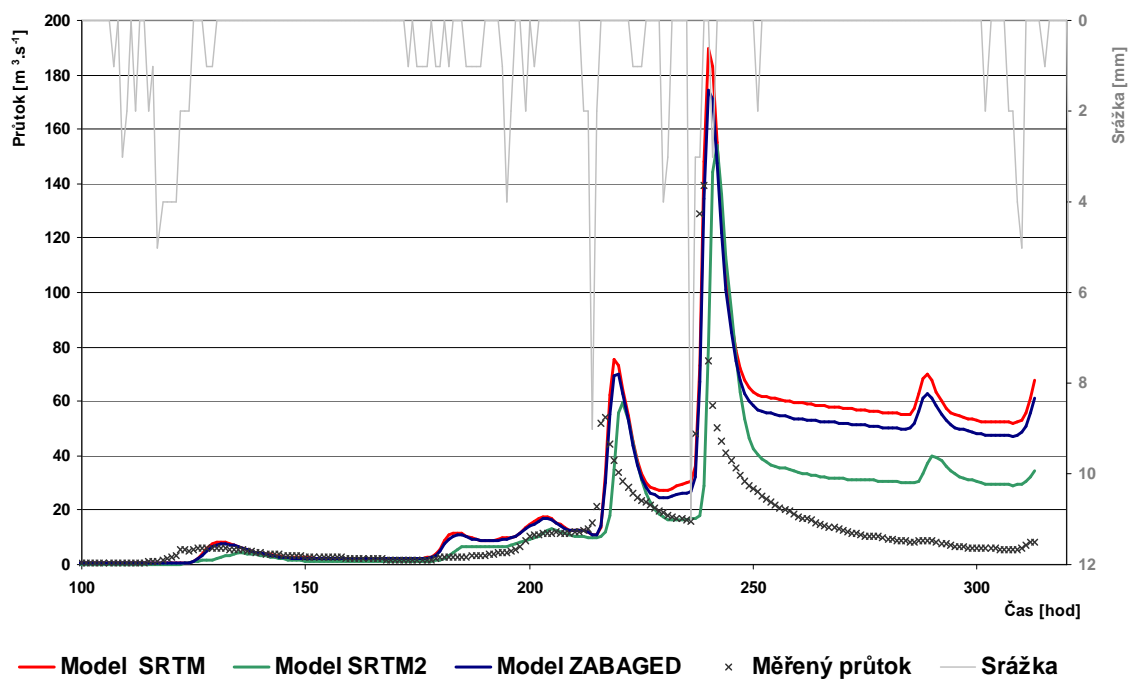
* Stanice Kozlovice měla z důvodu výpadku měření 27. srpna a 28. srpna do 5:00 hod. chybějící hodnoty. Z průběhu srážek v okolních stanicích lze usuzovat že chybějící hodnoty UPS výrazně nenavýší.

9.9 Srovnání modelovaných výsledků kalibrovaných modelů

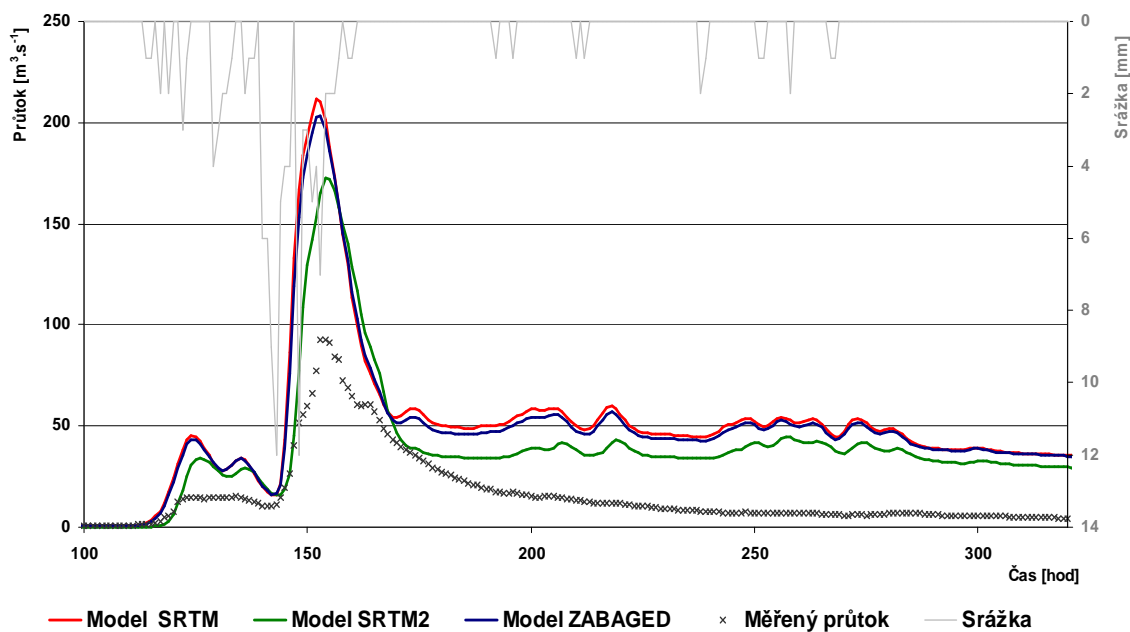
Pro rozšíření palety srovnatelných výsledků byl po kalibraci modelů použit pro výpočet modelovaného hydrogramu také druhý typ srážky zmíněný v kapitole 8.7, tj. regionální srážka v termínu 1. – 15. 9. 2007. (24 hodinová návrhová srážka již nebyla použita.) Hodnoty kulminačních průtoků a čas kulminace je uveden v Tab. 17 a časový průběh modelovaných průtoků z jednotlivých srážkoodtokových epizod na Obr. 53 a Obr. 54.

Tab. 17. Hodnoty kulminačních průtoků a časy kulminace pro použité srážkoodtokové epizody.

Model	Srážková epizoda	Kulminační průtok	Čas kulminačního průtoku
Měřený průtok	15. – 28. 6. 2009	139 m³.s⁻¹	24.6. 2009 23:00
SRTM	15. – 28. 6. 2009	189 m ³ .s ⁻¹	25.6. 2009 00:00
SRTM2	15. – 28. 6. 2009	144 m ³ .s ⁻¹	25.6. 2009 01:00
ZABAGED	15. – 28. 6. 2009	174 m ³ .s ⁻¹	25.6. 2009 00:00
Měřený průtok	1. – 15. 9. 2007	92,7 m³.s⁻¹	7. 9. 2007 9:00
SRTM	1. – 15. 9. 2007	211 m ³ .s ⁻¹	7. 9. 2007 8:00
SRTM2	1. – 15. 9. 2007	172 m ³ .s ⁻¹	7. 9. 2007 10:00
ZABAGED	1. – 15. 9. 2007	203 m ³ .s ⁻¹	7. 9. 2007 9:00



Obr. 53. Modelované hydrogramy kalibrovaných modelů. Srážková epizoda 15. – 28. 6. 2009 – přivalová konvektivní srážka.



Obr. 54. Modelované hydrogramy kalibrovaných modelů. Srážková epizoda 1. – 15. 9. 2007 (regionální srážka).

9.10 Zhodnocení výsledků modelů z dat SRTM a ZABAGED

Po kalibraci na předchozí vláhové podmínky povodí došlo u srážkové epizody 15. – 28. 6. 2009 (kulminační průtok $139 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) ke zpřesnění průtoků na rozdíl od $+15 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ v nejlepším případě (model SRTM2), do $+50 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ v nejhorším případě (model SRTM). U srážkové epizody 1. – 15. 9. 2007 (kulminační průtok $92,7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) je situace podstatně horší, hodnoty rozdílu od měřeného kulminačního průtoky kolísají mezi $+79$ až $+118 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Tyto silně nadhodnocené výsledky je pravděpodobně možné zdůvodnit velmi nízkým stavem nasycení povodí před začátkem srážkové události v kombinaci s velkými hodnotami výšky srážek v průběhu události. Použitá metoda SCS-CN má v literatuře popsánu kalibraci hodnot pouze ve třech stupních – běžné, nízké a vysoké nasycení, přičemž hodnoty pro nízké nasycení povodí jsou ve vegetačním období v rozsahu UPS 0 – 35 mm. Velmi nízké nasycení povodí proto nebylo možno dle popsaných postupů zkalibrovat a model silně nadhodnocuje průtoky. Postup přepočtu hodnot CN a počáteční ztráty přitom není složitý a bylo by možno po rozsáhlejší testování odvodit vztah pro kalibraci hodnot v podmínkách ČR ve větším rozsahu. V obou srážkových epizodách dosahoval modelovaných hodnot nejbližších měřenému kulminačnímu průtoky model SRTM2.

10 VLIV DAT PRO ODVOZENÍ PARAMETRŮ KRAJINNÉ SFÉRY NA VÝSLEDKY SRÁŽKOOTOKOVÉHO MODELOVÁNÍ

V této části práce je řešen vliv dat pro odvození parametrů krajinné sféry - v této případové studii se jednalo kombinace údajů o půdním pokryvu a využití země či krajinném pokryvu (LULC). Na základě podkladových dat dochází k odvození hlavního parametru pro hydrologickou transformaci - hodnoty CN (metoda SCS-CN, kap.7.1.3).

Pro odvození parametru CN byla použita data ve třech měřítkových řadách – 1:10 000, 50 000 a 100 000 (kapitola 7.2), z nichž vznikly tři semidistribuované srážkoodtokové modely ve stejném prostorovém rozlišení.

10.1 Metody srovnávání dílčích výsledků

Metodika srovnávání dílčích výsledků je stejně jako v předchozí kapitole založena na principu porovnání modelovaných hydrogramů z jednotlivých modelů používajících různou úroveň rozlišení vstupních geodat mezi sebou navzájem a v případě použití reálné srážkové epizody také s měřeným průtokem v závěrovém profilu povodí.

Srážkoodtokový model není v první části kalibrován, jsou srovnávány výsledky z modelu parametrizovaného přímo z použitých podkladových dat při preprocessingu. Ve druhé části došlo ke kalibraci všech modelů pomocí parametru UPS stejným způsobem jako v předchozí kapitole (metodika v kap.7.1.3).

10.2 Schematizace modelů

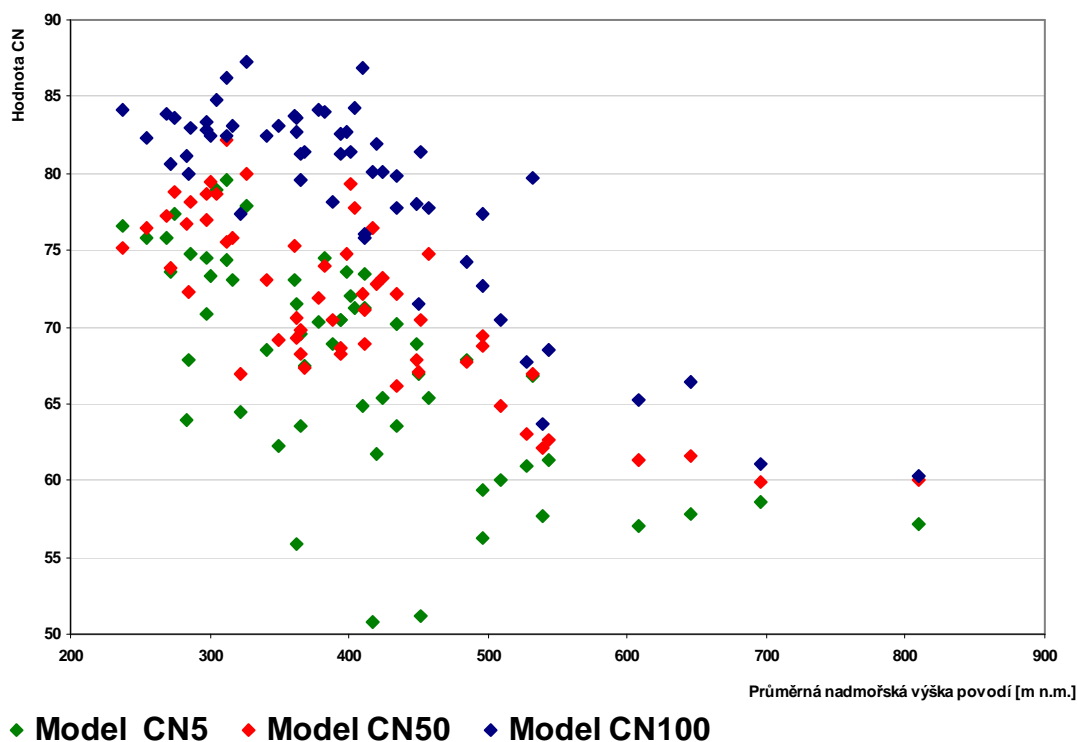
Jako geometrický základ pro tři srážkoodtokové semidistribuované modely použité v této kapitole byl použit model z kapitoly 9 označovaný ZABAGED, tzn. byl odvozen z digitálního modelu terénu interpolovaného z vrstevnic ZABAGED. Jeho základní geometrické parametry jsou uvedeny v kapitole 9.2, v Tab. 12.

Tento model byl doplněn parametry pro odvození odtokové ztráty dle metody SCS-CN (kap. 7.1.3), tzn. průměrnou hodnotou CN a hodnotou počáteční ztráty na subpovodí dle použitých vstupních geodat pro odvození parametrů krajinné sféry, přičemž zůstává zachována jeho základní geometrická složka (počet subpovodí a odtokových linií a jejich hydrografických parametrů). Metodika odvození hodnot CN z jednotlivých podkladů je popsána v kapitole 8.3. Tímto způsobem vznikly 3 porovnávané modely popsané v Tab. 18.

Tab. 18. Přehled označení a datových zdrojů modelů použitých pro srovnání.

Označení modelu	Zdroj půdních geodat	Zdroj geodat pro LULC
CN100	Půdní mapa ČR 1:100 000	CORINE Land Cover
CN50	Půdní mapa ČR 1:50 000	CORINE Land Cover
CN5	Kombinace lesních typologických map pro lesní půdu a BPEJ pro zemědělskou půdu	Databáze LULC vzniklá interpretací leteckých snímků

Srovnání odvozených hodnot CN a dalších parametrů v mapové podobě je uvedeno v přílohách 15 až 27. Na Obr. 55 je proveden přehled hodnot v subpovodích jednotlivých modelů v závislosti na průměrné nadmořské výšce subpovodí. Mezi hodnotou CN a nadmořskou výškou neexistuje přímá závislost, ale hodnota CN je ovlivněna nadmořskou výškou z důvodu ovlivnění půdních jednotek i jednotek LULC.



Obr. 55. Hodnoty CN odvozené pro jednotlivé modely.

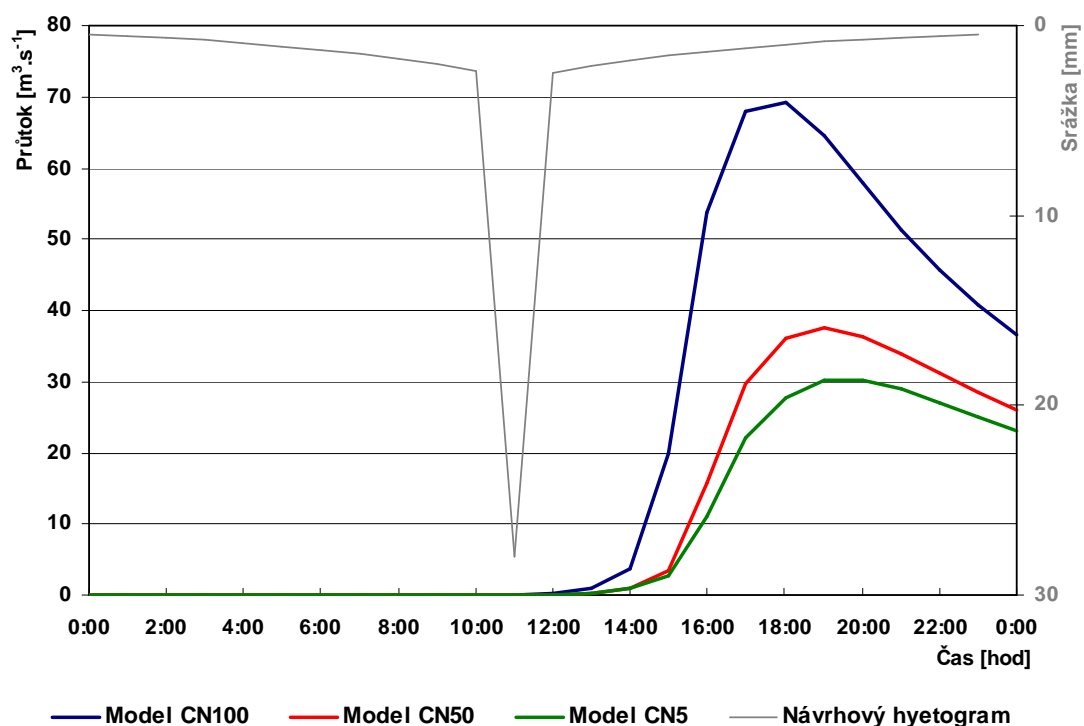
10.3 Výsledky nekalibrovaných modelů

V první fázi modelování byly stejně jako v kapitole 9 použity 2 srážkové epizody - návrhová 24 hodinová srážka a konvektivní srážka v období 15. – 28. 7. 2009.

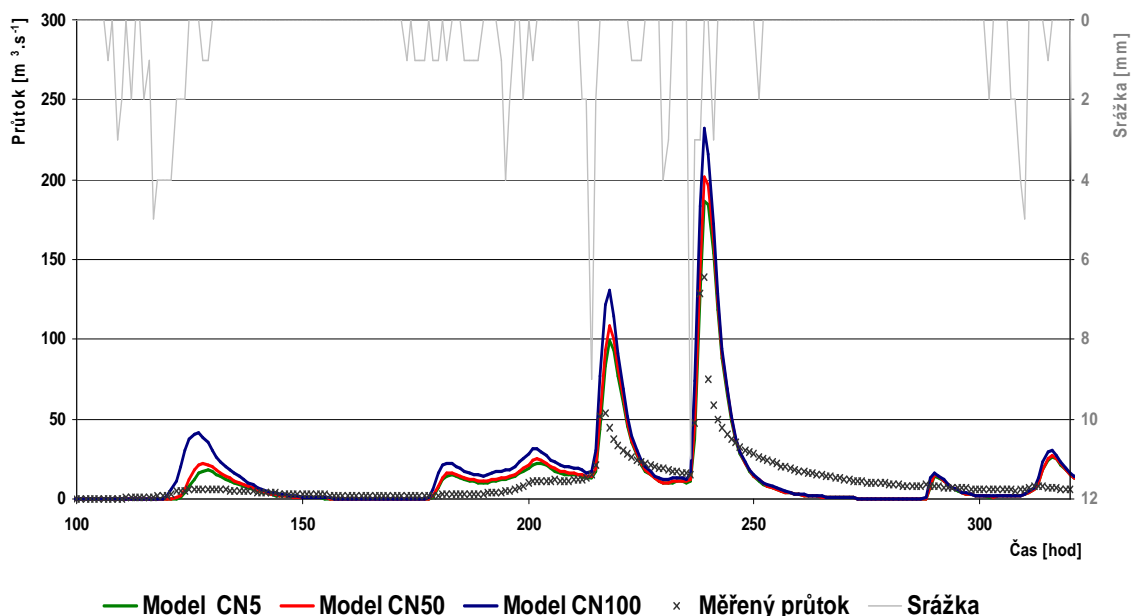
Výsledky modelování jsou uvedeny v Tab. 19 a na Obr. 56 (návrhová srážka) a Obr. 57 (reálná srážka). Tato srážka vyvolala v reálném povodí kulminační průtok $139 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, což odpovídá cca 10letému průtoku.

Tab. 19. Srovnání parametrů modelovaných hydrogramů z nekalibrovaných modelů založených na datech SRTM a ZABAGED (kulminační průtok reálné srážky - $139 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

Model - srážka	Kulminační průtok	Čas kulminačního průtoku
CN100- návrhová sr.	$69.3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	18:00
CN50 - návrhová sr.	$37.5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	19:00
CN5 návrhová sr.	$30.3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	19:00
Měřený průtok	$139 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	24.6. 2009 23:00
CN100 - reálná srážka	$232 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	24. 6. 2009 23:00
CN50- reálná srážka	$201 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	24. 6. 2009 23:00
CN5 - reálná srážka	$186 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	24. 6. 2009 23:00



Obr. 56. Modelované hydrogramy při použití 24 hodinové návrhové srážky.



Obr. 57. Modelované hydrogramy při použití reálné srážky.

10.4 Zhodnocení dílčích výsledků nekalibrovaných modelů

Stejně jako v minulé kapitole vykazují všechny nekalibrované modely silné nadhodnocení modelovaných průtoků oproti reálnému průtoku. Je však patrné, že použití dat s různým rozlišením má velký vliv na modelované průtoky, přičemž v tomto modelovém povodí je evidentní tendence výrazného snižování modelovaných průtoků s použitím geodat s větším rozlišením.

Je však možné bez ovlivnění srovnat pouze výsledky modelů CN100 a CN50, jelikož pro odvození půdních parametrů i parametrů LULC byla použita geodata o stejném účelu použití (Půdní mapy ČR ve dvou měřítkových řadách a CORINE Land Cover).

Výsledek srovnání kulminačního průtoku modelu CN5 může být ovlivněn různým účelem použití geodat pro odvození parametrů půdního pokryvu a LULC oproti modelům CN50 a CN100, jelikož může dojít k ovlivnění výsledné hodnoty CN i metodikou jejího odvození z dat BEPJ a lesních typologických map. Také databáze LULC z leteckých snímků vznikla účelově pro tuto případovou studii (kap. 7.2)

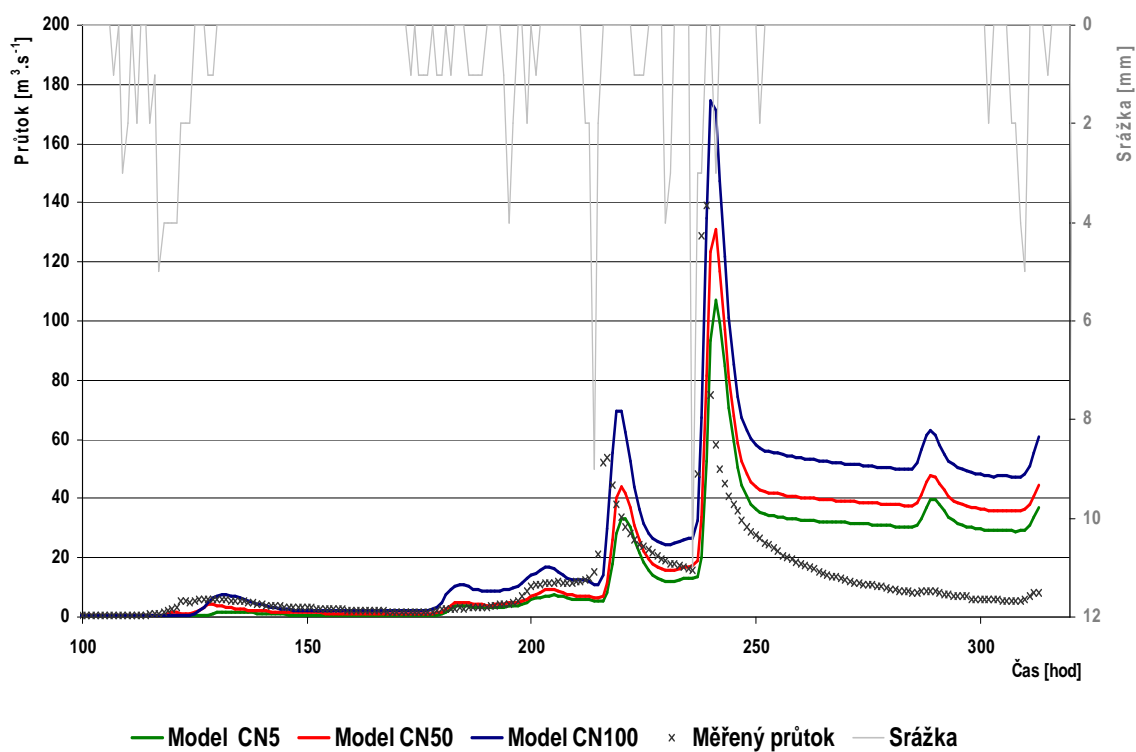
10.5 Výsledky modelů po kalibraci

Stejně jako v kapitole 9 byly všechny použité modely kalibrovány pomocí ukazatele předchozích vláhových podmínek UPS a pro rozšíření palety srovnatelných výsledků byl po kalibraci modelů použit pro výpočet modelovaného hydrogramu také druhý typ srážky zmíněný v kapitole 8.7, tj. regionální srážka v termínu 1. – 15. 9. 2007. (24 hodinová návrhová srážka již nebyla použita.)

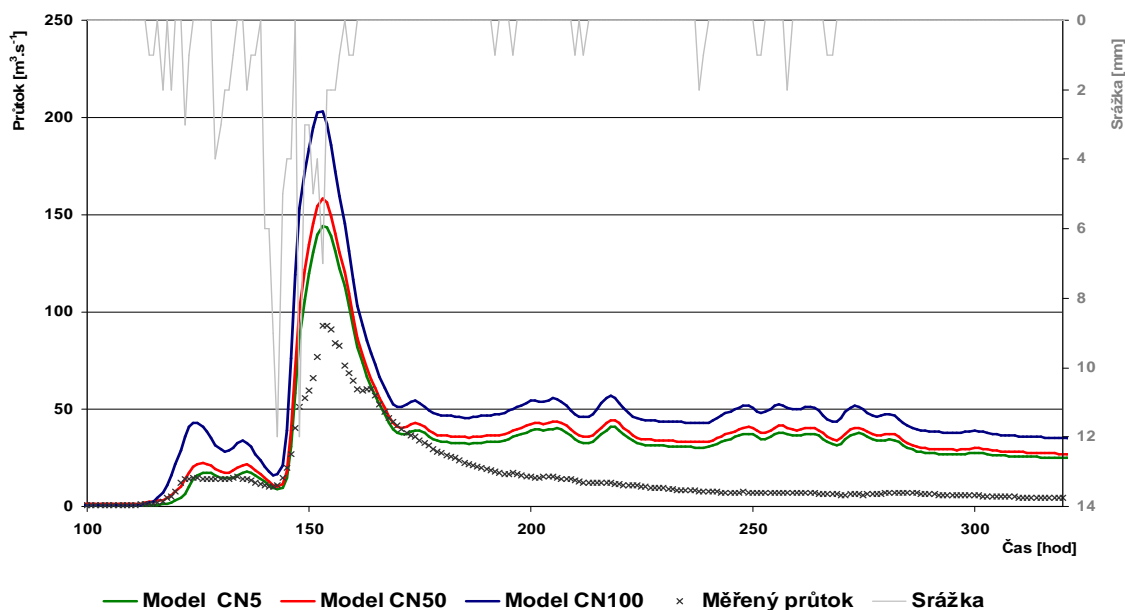
Hodnoty kulminačních průtoků a čas kulminace je uveden v Tab. 20 a časový průběh modelovaných průtoků z jednotlivých srážkoodtokových epizod na Obr. 58 a Obr. 59.

Tab. 20. Hodnoty kulminačních průtoků a čas kulminace pro použité srážkoodtokové epizody.

Model	Srážková epizoda	Kulminační průtok	Čas kulminačního průtoku
<i>Měřený průtok</i>	<i>15. – 28. 6. 2009</i>	<i>139 m³.s⁻¹</i>	<i>24.6. 2009 23:00</i>
CN100	15. – 28. 6. 2009	174 m ³ .s ⁻¹	25.6. 2009 00:00
CN50	15. – 28. 6. 2009	131 m ³ .s ⁻¹	25.6. 2009 01:00
CN5	15. – 28. 6. 2009	108 m ³ .s ⁻¹	25.6. 2009 01:00
<i>Měřený průtok</i>	<i>1. – 15. 9. 2007</i>	<i>92,7 m³.s⁻¹</i>	<i>7. 9. 2007 9:00</i>
CN100	1. – 15. 9. 2007	203 m ³ .s ⁻¹	7. 9. 2007 9:00
CN50	1. – 15. 9. 2007	158 m ³ .s ⁻¹	7. 9. 2007 9:00
CN5	1. – 15. 9. 2007	144 m ³ .s ⁻¹	7. 9. 2007 9:00



Obr. 58. Modelované hydrogramy kalibrovaných modelů. Srážková epizoda 15. – 28. 6. 2009 – příválová konvektivní srážka.



Obr. 59. Modelované hydrogramy kalibrovaných modelů. Srážková epizoda 1. – 15. 9. 2007 – regionální srážka.

10.6 Zhodnocení výsledků modelů CN10, CN50 a CN 100

Po kalibraci na předchozí vláhové podmínky povodí došlo stejně jako v kapitole 9 u srážkové epizody 15. – 28. 6. 2009 ke zpřesnění průtoků na rozdíl od $-8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ v nejlepším případě (model CN50), do $+35 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ v nejhorším případě (model CN100) od měřeného kulminačního průtoku.

U srážkové epizody 1. – 15. 9. 2007 je situace analogická se situací v kapitole 9, hodnoty rozdílu od měřeného kulminačního průtoku kolísají mezi $+51$ až $+110 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Tyto silně nadhodnocené výsledky je pravděpodobně možné zdůvodnit stejně jako v předchozí kapitole velmi nízkým stavem nasycení povodí před začátkem srážkové události v kombinaci s velkými hodnotami výšky srážek v průběhu události a nemožností přesněji kalibrovat hodnoty CN dle předchozích vláhových podmínek (kap. 9.10).

Při zvětšování úrovně rozlišení vstupních geodat pro jednotlivé modely je možné na modelovém případě pozorovat trend snižování modelovaných průtoků do té míry, že po kalibraci modelu dosáhl u srážkové epizody 15. – 28. 6. 2009 model CN5 kulminační průtok o $31 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ nižší než měřená hodnota. Důvodem tohoto podhodnocení může být:

- Metodika odvození hodnot CN z dat BEPJ a lesních typologických map nemusí být vhodná pro tyto účely, popřípadě data v těchto podkladech nemusí odpovídat skutečnosti. (Pacola 2002, Bělková 2004)
- Prostorové rozlišení modelu (velikost subpovodí) nemusí být vhodné vzhledem k rozlišení výše zmíněných geodat. Je možné že v při této úrovni rozlišení by lepší výsledky vykazoval distribuovaný model povodí.
- Vliv může vzhledem k rozlišení vstupních geodat sehrát také typ srážkových dat (bodové měření) a použitý meteorologický model (tj. metoda Thiessenových polygonů). Radarové odhady srážek by v tomto případě více odpovídaly rozlišení vstupních geodat.

11 ZÁVĚR

V práci byly stanoveny cíle vztahující se k použití geodat s různou úrovní rozlišení pro stavbu hydrologických modelů. Studován byl vliv těchto dat na modelované průtoky v závěrovém profilu vybraného povodí. Práce byla zaměřená na podkladová data, která lze v pro území České republiky reálně získat a měla charakter případové studie, což znamená že prezentované výsledky a závěry jsou platné pro vybrané povodí Lubiny a nelze je v tomto stadiu výzkumu zobecňovat.

Pro zpracování geodat a odvození parametrů jednotlivých prostorově založených semidistribuovaných modelů byly použity geoinformační technologie, které výrazně usnadňují získávání parametrů modelu jak v oblasti odvozování jejich geometrické složky, tak v oblasti zpracování dat pro odvození parametrů krajinné sféry. Bylo využito propojení geoinformačních technologií a prostorově založených hydrologických modelů které řeší oblast přenosu zjištěných parametrů do modelovacího hydrologického systému.

Výsledky, které byly dosaženy v rámci stanoveného cíle „Vliv použitých výškových dat na výsledky srážkoodtokového modelování“ lze shrnout do dvou bodů:

- Při použití výškových dat SRTM a ZABAGED pro odvození geometrické složky modelu, hydrografických parametrů povodí a odtokových linií je patrná odlišnost v hodnotě kulminačního průtoky 40% jeho hodnoty v případě nekalibrovaných modelů a 8% v případě modelů úspěšně kalibrovaných na předchozí vláhové podmínky povodí.
- Při změně rozlišení semidistribuovaného modelu (tj. změně velikosti subpovodí) tak aby lépe reflektoval prostorové rozlišení použitých výškových dat SRTM se odlišnost od modelu z dat ZABAGED snížila na 6% (nekalibrovaný model) a 3,5% (úspěšně kalibrovaný model).

Výsledky srovnávání naznačují, že při použití semidistribuovaného srážkoodtokového modelu záleží více na srovnatelné úrovni rozlišení samotného modelu (tj. velikosti jednotlivých subpovodí) ve vztahu k prostorovému rozlišení použitých podkladových dat než na samotném typu použitých výškových dat. Výšková data SRTM tedy lze použít pro stavbu semidistribuovaných modelů malých povodí, ale pro obdržení přijatelných výsledků je nutno dodržet podmínku odpovídajícího prostorového rozlišení srážkoodtokového modelu.

Výsledky dosažené v rámci cíle „Vliv použitých půdních dat v kombinaci s daty land-use/land-cover na výsledky srážkoodtokového modelování“ je možné vyjádřit změnou mezi jednotlivými modelovanými kulminačními průtoky, která vykazuje klesající tendenci se vzrůstající úrovní rozlišení dat použitých pro parametrizaci modelů (pokles o 13% a 20% oproti úrovni s nejnižší podrobností vstupních dat v případě nekalibrovaného modelu a o 25% a 38% v případě úspěšně kalibrovaného modelu).

Při srovnání modelovaných kulminačních průtoků s reálným průtokem v závěrovém profilu dochází k tomu, že se vzrůstající úrovní rozlišení vstupních geodat se modelovaný hydrogram přibližuje k měřeným průtokům. Výjimku tvoří model z dat s nejvyšší úrovní rozlišení, který v tomto srovnání díky výše zmíněné klesající tendenci podhodnotil kulminační průtok. Důvody této chyby byly diskutovány v kapitole 10.6, z hlediska řešeného rozlišení geodat je zde možné zmínit variantu malého rozlišení semidistribuovaného modelu vzhledem k rozlišení podkladových geodat nebo krizi v oblasti srážkových dat vzhledem k použitému meteorologickému modelu. Tyto závěry

však nejsou podloženy testováním a jsou proto uvedeny jako podnět k diskusi a k dalšímu výzkumu.

V rámci části cíle „Zhodnocení možnosti použití zmíněných geodat pro modelování malých povodí...“ je možné provést shrnutí v práci uvedených dílčích závěrů – všechna používaná geodata (kap. 7.2) je pro odvozování parametrů srážkoodtokových semidistribuovaných modelů možno použít, je však nutno dodržet především prostorové rozlišení modelu (velikost subpovodí) odpovídající úrovni rozlišení všech použitých geodat. Další doporučení a problémy jsou diskutovány v rámci dílčích závěrů.

Ve druhé části tohoto cíle „... a možnosti jejich kalibrace pomocí předchozích vláhových podmínek povodí“ není možné formulovat jednoznačný názor. V práci byly použity dvě srážkové epizody:

- srážkovou epizodu z června 2009 (přívalová srážka) bylo možno dle předchozích vláhových podmínek úspěšně (dle srovnání s reálným kulminačním průtokem) nakalibrovat. Ukazatel předchozích srážek se na jednotlivých srážkoměrných stanicích pohyboval v rozmezí 4.9 – 13.4 mm.
- Srážkovou epizodu ze září 2007 (regionální srážka) nebylo možno tímto způsobem nakalibrovat. Rozmezí ukazatele předchozích srážek zde bylo 0 – 8,5 mm.

Důvod této nejednoznačnosti je pravděpodobně v omezení vyplývající ze samotné metody SCS-CN, která umožňuje kalibraci parametrů pouze ve třech stupních. Podrobněji je omezení diskutováno v kap. 9.10

Na závěr je nutno opět zdůraznit, že prezentované výsledky a závěry vycházejí z případové studie na povodí Lubiny a nelze je zobecňovat. Lze tedy pouze konstatovat, že na tomto povodí k ovlivnění modelovaných průtoků úrovní rozlišení použitými vstupními geodaty dochází. Podobné výsledky lze tedy při použití stejných geodat a rozlišení semidistribuovaného srážkoodtokového modelu očekávat na povodích podobné velikosti a charakteru.

12 INFORMAČNÍ ZDROJE

1. Abbott, M. B., Bathurst, J. C., Cunge, J. A., O'Connell, P. E., and Rasmussen, J. (1986a). An introduction to the European Hydrologic System Systeme Hydrologique Europeen, SHE, 1: History and philosophy of a physically based, distributed modeling system. *Journal of Hydrology*, vol. 87, issue 1-2, pp. 45-59 DOI: 10.1016/0022-1694(86)90114-9.
2. Abbott, M. B., Bathurst, J. C., Cunge, J. A., O'Connell, P. E., and Rasmussen, J. (1986b). An introduction to the European Hydrologic System Systeme Hydrologique Europeen, SHE, 2: Structure of a physically based, distributed modeling system. *Journal of Hydrology*, vol. 87, issue 1-2, pp. 61-77. DOI: 10.1016/0022-1694(86)90115-0.
3. Adamec, M., Březková, L., Hanzlová, M., Horák, J., Unucka, J. (2006). Modelování vlivu land use na odtokové vztahy s podporou GIS. *Sborník 4. konference Říční krajina*. Olomouc, Univerzita Palackého.
4. Adrien, N, G. (2000). *Computational hydraulics and hydrology: an illustrated dictionary*. ISBN 0-8493-1890-4 CRC Press LLC, N.W. Corporate Blvd., Boca Raton, Florida, US.
5. Anderson, M.P., Woessner, W.W. (1992). *Applied groundwater modelling. Simulation of Flow and Advective Transport*. Academic Press. San Diego. 381 p.
6. Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., and Williams, J. R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment. Part I: Model development. *J. Am. Water Resour. Assoc.*, 34(1), 73–89.
7. Atlas ŽP (2006). Záplavové oblasti 2003. *Atlas životního prostředí v Praze*. Dostupné online: <http://www.wmap.cz/atlaszp/> Cit. 12.12.2006.
8. AOPK (2008). *Mapový server AOPK ČR*. Dostupné online, cit. 14. 3. 2008 <http://mapmaker.nature.cz/aopk/portal/>.
9. Bathurst, J.C., Wicks, J.M., O'Connell, P.E. (1995). The SHE/SHESED basin scale water flow and sediment transport modelling system. In *Computer Models of Watershed Hydrology*, V.P. Singh (ed), Water Resources Publications Highlands Ranch, Colorado, USA, 563-594.
10. Beasley, D.B., L.F. Huggins, Monke E.J. (1980). ANSWERS: A model for watershed planning. *Transactions of the ASAE*. 23(4):938-944. Dostupné online: <http://www.jswnonline.org/content/63/4/193.refs>.
11. Bedient, P.B., Huber W. C. (2002). *Hydrology and floodplain analysis*. 2nd edition. London, Prentice-Hall, 763 s.

12. Bedient, P.B., Huber, W.C. et Vieux, B.C. (2007): *Hydrology and Floodplain analysis*. 4th edition. Prentice Hall, London. 795 s.
13. Beven, K. J. (1995). TOPMODEL. Computer models of watershed hydrology, Chapter 18. V. P. Singh, ed., *Water Resources Publications*, Littleton, Colorado.
14. Beven, K. J., Kirkby, M. J. (1976). *Toward a simple physically-based variable contributing area of catchment hydrology*. Working Paper No. 154, School of Geography, Univ. Leeds, U.K.
15. Beven, K. J., Kirkby, M. J. (1979). A physically based variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrol. Sci. Bull.*, 24(1), 43–69.
16. BEVEN, K.J. (2002). *Rainfall-Runoff modelling*. The Primer. London, John Wiley & Sons. 372 s.
17. Bělková, I. (2004). *Bonitované půdně ekologické jednotky – zhodnocení stávajícího stavu*. Diplomová práce. Ostravská univerzita v Ostravě.
18. Boulding, J.R., Ginn, J.S. (2009). User of Models and Computer in Contaminant Investigations in *Practical Handbook of Soil, Vadose Zone, and Ground-Water Contamination: Assessment, Prevention, and Remediation*. Second Edition. Dostupné online: <http://www.environetbase.com>.
19. Bouraoui, F., Braud, I., and Dillaha, T. A. (2002). ANSWERS: A non-point source pollution model for water, sediment and nutrient losses. Mathematical models of small watershed hydrology and applications, V. P. Singh and D. K. Frevert, eds., *Water Resources Publications*, Littleton, Colo.
20. Brunner, G.W. (2006) *HEC-RAS, River Analysis System User's Manual*. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. Davis, CA. Dostupné online, cit. 3.2.2007. <http://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/hecras-document.html>
21. Buček A., Lacina J. (1999). *Geobiocenologie II*. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita Brno, 249 str.
22. Burý, A. (1989). *Simulace a modelování důlních systémů*. Vysoká škola báňská – Technická univerzita, Hornicko-geologická fakulta, 211 s.
23. Buzek, L., a kol. (1986). *Beskydy – příroda a vztahy k ostravské průmyslové oblasti*. 1. vyd. Ostrava, Pedagogická fakulta v Ostravě, 349 s.
24. Cameron, T., Ackerman, P.E. (2006). *HEC-GeoRAS GIS Tool for Support of HEC-RAS using ArcGIS*. Hydrologic Engineering Center. Dostupné online, cit. 12.12.2006. <http://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/hecras-document.html>.

25. CGIAR (2009). *SRTM Data Processing Methodology*. Consortium for Spatial Information (CGIAR-CSI). Dostupné online, cit. 16. 8. 2009. <http://srtm.csi.cgiar.org/SRTMdataProcessingMethodology.asp>.
26. ČHMÚ (2006). *O numerické předpovědi počasí*. Český hydrometeorologický ústav. Dostupné online, cit. 12. 3. 2006. <http://www.chmi.cz/meteo/ov/aladin/aboutnwp/index.php>
27. ČHMÚ (2008). *Informace o klimatu*. Český hydrometeorologický ústav. 1997 - 2008, Dostupné online, cit. 16. 6. 2008. <http://www.chmi.cz/meteo/ok/infklim.html>.
28. ConceptDraw (2009). *Chen ER Diagram*. Dostupné online, cit. 2. 3. 2009 <http://www.conceptdraw.com/products/img/ScreenShots/cd5/software/ChenERD.gif>.
29. Chow, V. T., Maidment, D. R., Mays, L. W (1988). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill Book Company, New York, New York, 572 pp.
30. De Barry, P., A. (2004). *Watersheds: processes, assessment and management*. Hoboken, John & Sons, 700 s.
31. DHI (2006). *Close-up of DHI 3D Shallow Water Wavemaker*. Danish Hydraulic Institute. Dostupné online, cit. 23.3. 2006. www.dhi.dk
32. El-Sheimy, N., Valeo, C., Habib A. (2005). *Digital Terrain Modeling - Acquisition, Manipulation and Applications*. ISBN 1-58053-921-1, Artech House, Inc., Norwood, Massachusetts.
33. ESRI (2006a) *Creating a depressionless DEM*. ArcGIS webhelp. ESRI. Dostupné online, cit. 5. 12. 2006. <http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop>.
34. ESRI (2006b) *Deriving runoff characteristics*. ArcGIS webhelp. ESRI. Dostupné online, cit. 5. 12. 2006. <http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop>.
35. ESRI (2006c) *Digital terrain models*. ArcGIS webhelp. ESRI. Dostupné online, cit. 12. 3. 2006. <http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop>.
36. ESRI (2006d) *Stream to Feature (Streamline)*. ArcGIS webhelp. ESRI. Dostupné online, cit. 12. 3. 2006. <http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop>.
37. Fárek, V., Unucka, J. (2010). Modelování povrchového odtoku v extrémním reliéfu. *Symposium GIS Ostrava 2010*. VŠB-TU Ostrava.
38. Fedra, K. (1996) Distributed models and embedded GIS: integration strategies and case studies, *In GIS and Environmental Modeling: Progress and Research Issues*, edited by M. F. Goodchild et al., GIS World Book, Fort Collins, 414-417.
39. Feldman, A. D. (1981). HEC models for water resources system simulation: Theory and experience. *Advances in Hydrosiences*, 12, Academic Press, New York, NY.

40. Feldman, A.D., ed. (2000). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS. Technical Reference Manual*. Hydrologic Engineering Center. Dostupné online, cit. 12. 12. 2006. <http://www.hec.usace.army.mil/software>.
41. Fedra, K. (1996). Distributed models and embedded GIS: integration strategies and case studies. In *GIS and Environmental Modeling: Progress and Research Issues*, edited by M. F. Goodchild et al., GIS World Book, Fort Collins, 414-417.
42. Fleming, M.J., Doan, J.H. (2009). *HEC-GeoHMS. Geospatial Hydrologic Modeling Extension*. Hydrologic Engineering Center. Dostupné online, cit. 12. 6. 2009 <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-geohms/download.html>.
43. Gregorech, E.G., et al. (2009). *Soil and environmental science dictionary*. Canadian Society of Soil Science. ISBN 0-8493-3115-3. Dostupné online, cit. 14. 4. 2009. <http://www.environetbase.com>.
44. HMÚ (1965). *Hydrologické poměry ČSSR, Díl 1. – Text*. Kolektiv pracovníků Hydrologické služby HMÚ, 1. vyd., Hydrometeorologický ústav, Praha, 414 s.
45. HMÚ (1967). *Hydrologické poměry ČSSR, Díl 2*. Kolektiv pracovníků Hydrologické služby HMÚ, 1. vyd., Hydrometeorologický ústav, Praha, 557 s.
46. HMÚ (1970). *Hydrologické poměry ČSSR, Díl 3*. Kolektiv pracovníků Hydrologické služby HMÚ, 1. vyd., Hydrometeorologický ústav, Praha, 557 s.
47. Hrádek, F., Kovář, P. (1994). Výpočet redukce náhradních intenzit přívalových dešťů. Metoda redukce 1denních maximálních srážkových úhrnů. *Vodní hospodářství a ochrana ovzduší*, č. 11/12.
48. Hrádek, F., Kuřík, P (2004). *Hydrologie*. 1. vyd. Praha. Česká zemědělská univerzita v Praze, 280 s. ISBN 80-213-0950-4.
49. Humusoft (2006). *Všeobecná klasifikace modelů*. Dostupné online, cit. 23.5.2006. <http://www2.humusoft.cz/www/pub/witness/ppt/inovacia2002/sld007.htm>.
50. Hutchinson, M.F. (1989). A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. *Journal of Hydrology*. 106, 211-232.
51. Hutchinson, M.F. and Gallant, J.C. (2000). Digital elevation models and representation of terrain shape. In: Wilson, J.P. and Gallant, J.C. (eds.), *Terrain Analysis: Principles and Applications*, Wiley, New York, Chapter 2, pp 29-50.
52. Jandora, J., Stara, V., Starý, M. (2002). *Hydraulika a hydrologie*. 1. vyd. Brno. Vysoké učení technické v Brně, Stavební fakulta. 186 s. ISBN 80-214-2204-1.
53. Janeček, M., a kol. (2002). *Ochrana zemědělské půdy před erozí*. 1. vyd. Praha : ISV nakladatelství, 2002. 201 s. ISBN 85866-85-8.

54. Julien, P. Y., and Saghafian, B. (1991). *CASC2D user's manual*. Dept. of Civil Engineering Rep., Colorado State Univ., Fort Collins, Colo.
55. Kaňok, J. (1999). *Tematická kartografie*. Ostravská univerzita v Ostravě. Ostrava 1999, 318 s. ISBN 80-7042-781-7.
56. Kaňok, J. (1987). Antropogenní ovlivnění velikosti průtoků řek povodí Odry po profil Kožle. *Spisy prací přírodovědecké fakulty Ostravské univerzity*. č. 103, 188 s. + mapa. ISBN 80-7042-749-3
57. Klimko, E. (1998). *Lesnická pedologie*. 2. vyd. Brno. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 259 s. ISBN 80-7157-306-X.
58. Kopp, J. (2005). Hydrografická analýza povodí s využitím GIS. *Sborník konference Hydrologické dni 2005*. Bratislava.
59. Kříž, V. (2004). *Moravskoslezský kraj – klimatické a hydrologické poměry*. 1. vyd. Ostrava. Ostravská univerzita v Ostravě, PřF KFGG, 43 s. ISBN 80-7042-994-1
60. Kubát, J. (2006). *Hydrologická ročenka České republiky 2005*. Praha, ČHMÚ. Dostupné online, cit. 6. 3. 2008. <http://www.chmi.cz/hydro/hr05/obsah.html>.
61. Kulhavý, Z., Kovář, P. (2000). *Využití modelů hydrologické bilance pro malá povodí*. 1. vyd. Praha, VÚMOP Praha, 123 s. ISSN 1211-3972.
62. Kutílek, M., Kuráž, V., Císlerová, M. (2004). *Hydropedologie 10*. Dotisk 2. přeprac. vyd. Praha, ČVUT, 176 s. ISBN 80-01-02237-4.
63. Leavesley, G.H., Lichty, R.W., Troutman, B.M., Saindon, L.G., (1983). Precipitation Runoff Modeling System: User's Manual: *U.S. Geological Survey Water Resources Investigations Report 83 4238*, 207 p.
64. Löw, J. et al. (1995). *Rukověť projektanta místního územního systému ekologické stability*. 1. vyd. Brno, 124 s. + příloha. ISBN 1081-067-1995.
65. Maidment, D. (2002). *ArchHydro: GIS for Water Resources*. Redlands, CA, ESRI.
66. Maidment, D.R. (ed.) (1993). *Handbook of Hydrology*. 1st edition. London, McGraw-Hill Professional. 1424 s. ISBN 0-07-039732-5.
67. Maidment, D., Djokic, D. (ed.) (2000). *Hydrologic and Hydraulic Modeling Support with Geographic Information Systems*. Redlands, ESRI Press. 232 s.
68. Maidment, D. (2010) „Burn-In“ Techniques. *AGREE method. Terrain Reconditioning*. Dostupné online, cit. 12. 01. 2010. <http://www.ce.utexas.edu/prof/maidment/GISHYDRO/ferdi/research/agree/agree.html>.

69. Marsik, M. (2008). *GIS and Hydrologic Modeling: An environmental focus*. University of Florida, Gainesville, USA. Dostupné online, cit. 20. 5. 2008. <http://www.clas.ufl.edu/users/marsik/hydromodeling.pdf>.
70. Mishra, K., M., Singh, V., P. (2003). *Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) Methodology*. 1. vyd. Kluwer Academic Publishers, 536 s. ISBN1-4020-1132-6.
71. Molnár, Z. (2009) *Úvod do základů vědecké práce*. Syllabus pro potřeby semináře doktorandů. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta managementu a ekonomiky. Dostupné online: web.fame.utb.cz/cs/docs/Základy_vědecké_práce.doc
72. MZE (2006). *Vodohospodářský informační portál*. Ministerstvo zemědělství. Dostupné online, cit. 12. 12. 2006. <http://www.voda.mze.cz/>.
73. NASA (2009). *Shuttle Radar Topography Mission*. Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology. Dostupné online, cit. 25. 9. 2009. <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>.
74. Netopil, R. (1970). *Základy hydrologie povrchových a podpovrchových vod*. 1. vyd. Státní pedagogické nakladatelství, Praha. Univerzita J. E. Purkyně v Brně, 223 s.
75. Němeček, J. a kol. (2001). *Taxonomický klasifikační systém půd České republiky*. 1. vyd. Praha : ČZU Praha, 78 s. ISBN 80-238-8061-6.
76. Němeček, J. a kol. (2009). *Elektronický taxonomický klasifikační systém půd ČR*. ÚVT, s.r.o., BENETA.cz, s.r.o. Dostupné online, cit. 14. 2. 2009 <http://klasifikace.pedologie.cz>
77. Nyerges, T. L. (1993). Understanding the scope of GIS: its relationship to environmental modeling, In *Environmental Modeling with GIS*, edited by M. F. Goodchild, B.O. Parks, and L. T. Steyaert, 75-84.
78. Obenour, D. (2003). *Developing an Arc Hydro Dataset*. Retrieved April 20, 2005 from CRWR's ArcHydro Web site. <http://www.crwr.utexas.edu/giswr/hydro/ArcHOSS/Publications/index.cfm>.
79. OIŘS (2006). *Začátky fuzzy logiky*. Katedra kybernetiky, Fakulta aplikovaných věd, Západočeská univerzita, Plzeň. Dostupné online, cit. 5. 2. 2006. vendulka.zcu.cz/Download/Free/spec_metody.doc
80. Ogden F.L, Sharif H.O., Senarath S.U.S., Smith J.A., Baeck M.L., Richardson J.R. (2000). Hydrologic analysis of the Fort Collins, Colorado, flash flood of 1997. *Journal of Hydrology*, 228 (12): 82-100.
81. Olivera, F. (2009). *Watershed and Stream Hydrologic Parameters*. Dep. of Civil Engineering, Texas A&M University. Dostupné online, cit. 26.10. 2009. <https://ceprofs.civil.tamu.edu/folivera/CVEN423/Fall2004/SWParameters.ppt>.

82. Pacola, M. (2002). *Degradační procesy zemědělské půdy zjištěné v rámci aktualizace BPEJ*. Soil and Water, č. 1, s.73 – 80.
83. Pankratz, T. M. (2008). *Environmental engineering dictionary and directory*. Dostupné online: <http://www.environetbase.com>. ISBN 1-56670-543-6.
84. Peuquet, D. J. (1999). *Time in GIS and geographical databases*. P. A. Longley, M. F.
85. Plíva K (1971). *Typologický systém ÚHÚL*. ÚHÚL Brandýs nad Labem, 1971.
86. Plíva, K., Žlábek, I. (1986). *Přírodní lesní oblasti ČSR*. 1. vyd. Praha. Státní zemědělské nakladatelství,. 316 s.
87. Průša E. (2001). *Pěstování lesů na typologických základech*. 1. vyd. Kostelec nad Černými lesy : Lesnická práce, s.r.o., 2001. 593 s. ISBN 80-86386-10-4.
88. Quitt E. (1971). Klimatické oblasti Československa. *Studia Geographica*, fasc. 16.Geografický ústav ČSAV Brno.
89. Rapant, P. (2006). *Geoinformatika a geoinformační technologie*. VŠB-TU Ostrava. ISBN 80-248-1264-9. Dostupné online, <http://gis.vsb.cz>.
90. Raper, J. and Livingstone, D. (1993). High level coupling of GIS and environmental process modeling. *Second International Conference/Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling*. Breckenridge, CO. Sept. 1993.
91. Refsgaard, J.C., and B. Storm. (1995). MIKE SHE. Computer Models of Watershed Hydrology. In Singh, V.P. (ed.), *Water Resources Publications*, Littleton Colorado, Chapter 23, 809-846.
92. Robbayo, O. (2006). *An overview of the Map2Map Application*. Map2Map Presentation, dostupné online, cit. 12.12.2006: <http://www.crrw.utexas.edu/gis/gishydro04/Modeling/Map2MapFiles/OnM2M.ppt>
93. Růžicková, K. (2006). *Modelování a simulace v geovědách*. Presentace, VŠB-TU Ostrava.
94. Schraffenberg, W.A., Flemming, M.J. (2006). *Hydrologic modeling system HEC-HMS user's manual*, version 2. Engineering, U.S. Army Corps of Engineers, Davis, Calif. <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-geohms/download.html>.
95. Sherman, L. K., (1932). Streamflow from Rainfall by Unit-Graph Method. *ENR (Engineering News-Record)* 108:501-505.
96. Singh, V.P., Woolhiser, D. A. (2002). Mathematical Modeling of Watershed Hydrology. *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, Vol. 7, No. 4, pp. 270-292.

97. Smith, R. E., Goodrich, D. C., Woolhiser, D. A., and Unkrich, C. L. (1995). KINEROS—A kinematic runoff and erosion model. Computer models of watershed hydrology. V. P. Singh, ed., *Water Resources Publications*, Chapter 20, Littleton, Colorado.
98. Šebej, P. (2003). Úloha obvykle nazývaná Einsteinová hádanka. Dostupné online, cit. 4.3.2007. <http://vivatvivat.szm.com/part202215.htm>.
99. Šercl, P. (2004). *Odvozování fyzicko-geografických charakteristik povodí v GIS*. Interní materiál ČHMÚ, Praha.
100. Svobodová, L. (2008). *Odvození infiltrace metodou SCS*. Diplomová práce. Ostravská univerzita v Ostravě.
101. Tomášek, M. (2007). *Půdy České republiky*. 4. vyd. Praha, Česká geologická služba, 67 s. ISBN 978-80-7075-688-1.
102. Trupl, J. (1958). *Intensity krátkodobých dešťů v povodích Labe, Odry a Moravy*. Práce a studie č. 97, VÚV Praha.
103. Unucka, J., Horák, J., Rapantová, N. (2005). Možnosti propojení GIS s hydrologickými a hydrogeologickými modely. *Sborník konference Hydrologické dny 2005*. Bratislava, s. 198- 210.
104. Unucka, J. (2006) *Hydrologické a vodohospodářské aspekty revitalizace řeky Bečvy*. Disertační práce. Ostravská univerzita v Ostravě.
105. Unucka, J., Horák, J. a kol. (2010). *Srážkoodtokové modelování s využitím geoinformačních technologií*. VŠB-TU Ostrava. V tisku. 352 s.
106. Unucka, J., Adamec, M. (2007). Modelování vlivu land use na erozní procesy s podporou GIS. *Říční krajina*. Olomouc. UP Olomouc, 2007. s. 331-340. ISBN 978-80-244-1890-2.
107. Unucka, J., Adamec, M. (2008). Modelování vlivu krajinného pokryvu na srážkoodtokové vztahy v povodí Olše. *Vodohospodářský Časopis / Journal of Hydrology and Hydromechanics*. Roč. 2008, sv. 56, s. 257-271. ISSN 0042-790X.
108. USGS (2009). *Oběh vody: The Water Cycle*. Český hydrometeorologický ústav. U.S. Geological Survey. Dostupné online, cit. 2. 3. 2009. <http://ga.water.usgs.gov/edu/watercycleczech.html>.
109. ÚÚG (1985). *Beskydy a Podbeskydská pahorkatina 1 : 100 000*. Ústřední ústav geologický, Praha, mapa + příloha.
110. Van der Heijde, P.K.M., Beljin, M.S. (1988). *Model Assessment for Delineating Wellhead Protection Areas*. EPA 440/6-88-220. Office of Ground-Water Protection, Environmental Protection Agency, Washington.D.C.

111. Vieux, B. E., Bralts, V. F., Segerlind, L. J., Wallace, R. B., (1990). Finite element watershed modeling: One dimensional elements., *J. of Water Resources Planning and Management*, 116(6), 803-819.
112. Vieux, B.E. (2004). *Distributed Hydrologic Modeling Using GIS*. Water Science and Technology Library. Springer, 2nd edition, 294 str. ISBN978-1402024597.
113. Vincoli, J. W. (2000). *Lewis' Dictionary of Occupational and Environmental Safety and Health*. Dostupné online: <http://www.environetbase.com>. Boca Raton: CRC Press LLC.
114. Vlček, V. (ed.) a kol. (1984). *Vodní toky a nádrže*. (Zeměpisný lexikon ČSR). Academia, Praha, 315 s. 21-107-84.
115. Ward R.C. (1975). *Principles of hydrology*. McGraw – Hill Book Company, London.
116. Wigmosta, M. S., L. W. Vail, and D. P. Lettenmaier (1994). A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain, *Water Resources Research*, 30(6), 1665–1679.
117. Wolock, D. M., and G. J. McCabe Jr. (1995). Comparison of Single and Multiple Flow Direction Algorithms for Computing Topographic Parameters in TOPMODEL. *Water Resources*, 31(5), 1315–1324.
118. Woolhiser, D. A., Smith, R. E., and Goodrich, D. C. (1990). *KINEROS—A kinematic runoff and erosion model: Documentation and user manual*. Rep. No. ARS 77, USDA, Washington, D.C.
119. Young, R. A., Onstad, C. A., Bosch, D. D., Anderson, W. P. (1989). AGNPS: A non-point source pollution model for evaluating agricultural watershed. *J. Soil Water Conservat.*, 44(2), 168–173.
120. Young, R.A., Onstad, C.A., Bosch, D. D., Anderson, W.P., (1995). AGNPS: An agricultural nonpoint source model. In Singh V.P. (ed.), *Computer Models of Watershed Hydrology*, Littleton, Colorado, *Water Resources Publications*, Chapter 26, 1011-1020
121. Voženílek, V. (2009). *Modelování v GIS*. Prezentace, Univerzita Palackého Olomouc. Dostupné online, cit. 22. 1. 2009. http://gis.vsb.cz/vzdelavani/Celoziv_Vzdel/Anotace/modelovani_v_gis.htm.
122. Zlatník, A. (1956). Nástin lesnické typologie na biogeocenologickém základu a rozlišení československých lesů podle skupin lesních typů. *Pěstování lesů 3*. Polanský B. (ed.), Praha, SZN: 317–401.
123. Zlatník, A.. (1970). *Lesnická botanika speciální*. Státní zemědělské nakladatelství, Praha, 666 str.

13 PUBLIKACE AUTORA VZTAHUJÍCÍ SE K TÉMATU PRÁCE

1. Adamec, M. (2010). Vliv použitých výškových dat na výsledky srážkoodtokového modelování v povodí Lubiny. *Sborník - Symposium GIS Ostrava 2010*. VŠB - Technická univerzita Ostrava 2010. ISBN 978-80-248-2171-9.
2. Adamec, M. (2009). *Vliv použitých výškových dat na odvozování hydrografických údajů pro srážkoodtokové modelování*. Prezentace. Praha, ArcDATA ČR.
3. Adamec, M. (2009). Vliv použitých výškových dat na odvozování hydrografických údajů pro srážkoodtokové modelování. Výsledky soutěže posterů na 18.konferenci GIS ESRI v ČR. *ArcREVUE*. Roč. 18, s. 23-23. ISSN 1211-2135.
4. Unucka, J., Hanzlová, M., Žídek, D., Adamec, M. (2008). Modelování vlivu lesa na srážkoodtokové vztahy s pomocí GIS. *Sborník z 15. ročníku mezinárodního symposia GIS Ostrava 2008*. Ostrava. TANGER spol. s r.o., s. 69.
5. Adamec, M., Kaňok, J. (2008). Geoinformatická podpora srážkoodtokového modelování. *Sborník abstraktů výroční mezinárodní konference ČGS*. Liberec. Technická univerzita v Liberci, s. 80-80. ISBN 978-80-7372-367-5.
6. Unucka, J., Adamec, M. (2008). Modelování vlivu krajinného pokryvu na srážkoodtokové vztahy v povodí Olše. *Vodohospodářský Časopis / Journal of Hydrology and Hydromechanics*. Roč. 2008, sv. 56, s. 257-271. ISSN 0042-790X.
7. Unucka, J., Adamec, M. (2007). Modelování vlivu land use na erozní procesy s podporou GIS. *Říční krajina*. Olomouc, UP Olomouc, s. 331-340. ISBN 978-80-244-1890-2.
8. Adamec, M., Hanzlová, M., Horák, J., Unucka, J., Žídek, D. (2007). Modelování hydrologických extrémů s podporou DPZ a GIS. *Sborník konference Povodně a změny v krajině*. UK Praha.
9. Adamec, M., Sedlářiková, R. (2006). *Modelování environmentálních procesů na katedře fyzické geografie a geoekologie*. Prezentace. 15. konference GIS ESRI v ČR. Praha.
10. Adamec, M., Březková, L., Hanzlová, M., Horák, J., Unucka, J. (2006). Modelování vlivu land use na odtokové vztahy s podporou GIS. *Sborník 4. konference Říční krajina*. Olomouc, Univerzita Palackého.
11. Adamec, M. (2005). Využití GIS v hydrologickém modelování. *Sborník konference Hydrologické dni 2005*. Bratislava, ISBN 80-88907-53-5.
12. Adamec, M., Unucka, J. (2005). Vliv dostupnosti a mezinárodní výměny dat na predikci povodňových stavů příhraničních toků na příkladu povodí Olše. *Sborník příspěvků z Mezinárodní konference Transformační procesy 1990 - 2005*. Ostrava, Ostravská univerzita v Ostravě, s. 232 -238. ISBN 80-7368-106-4.
13. Adamec, M., Sedlářiková, R. (2004). Návrh elektronické podoby Hydrologického atlasu povodí Odry po profil Kožle. *Geografie a proměny poznání geografické reality*. Ostrava, Ostravská univerzita v Ostravě, s. 616-622. ISBN 80-7042-788-4.

14 SEZNAM PŘÍLOH